

诺贝尔奖百年鉴

宇宙佳音

天体物理学

吴鑫基　温学诗 / 著



上海科技教育出版社



吴鑫基　温学诗／著

诺贝尔奖百年鉴

■ 天 体 物 理 学 ■

宇宙佳音



上海科技教育出版社

诺贝尔奖百年鉴

天体物理学

宇宙佳音

吴鑫基　温学诗　著
丛书策划　卞毓麟　匡志强
责任编辑　卞毓麟
装帧设计　桑吉芳

出版　上海科技教育出版社
　　　上海冠生园路 393 号
邮政编码　200235
发行　上海科技教育出版社
经销　各地新华书店
印刷　常熟市印刷八厂
开本　787×960　1/32
印张　4.75
字数　87 000
版次　2001 年 9 月第 1 版
印次　2001 年 9 月第 1 次印刷
印数　1－5 000
书号　ISBN 7－5428－2662－X/N·427
定价　8.00 元

策划语

从1901年开始颁发的诺贝尔奖，可以说是20世纪物理学、化学和生命科学发展的缩影。它记录了百年来这三大学科的几乎所有重大成就，对世界科学事业的发展起了很大的促进作用，被公认为科学界的最高荣誉。人们崇敬诺贝尔奖，赞叹诺贝尔奖得主们的科学贡献，并已出版了许多相关书籍。

那么，我们为什么还要策划出版这套《诺贝尔奖百年鉴》丛书呢？

这是因为，有许多热爱科学的读者，很希望有这样一套书，它以具体的科学内容为基础，使社会公众也能对科学家们的成就有一定的感性认识；它以学科发展的传承性为主线，让读者领略科学进步的永无止境；它还是简明扼要、通俗易懂的，令读者能轻松阅读，愉快受益。

基于这种考虑，本丛书将百年来三大学科的全部诺贝尔奖按具体获奖内容分为26个领域，每个领域写成一卷8万字左右的小书，以该领域的进展为脉络，以相关的诺贝尔奖获奖项目为重点，读者将不但能了解这些诺贝尔奖成果的科学内容，更能知道这个领域的发展历

程。丛书的分卷不局限于一级学科的分类，以体现现代科学之间的交融。此外，丛书还另设了3卷综述，便于读者对这三大学科的全貌有一个宏观认识。丛书29卷内容如下：

20世纪物理学革命　　现代有机化学
20世纪化学纵览　　无机物与胶体
20世纪生命科学进展　　材料物理与化学
X射线与显微术　　现代分析技术
核物理与放射化学　　生物分子结构
量子物理学　　量子与理论化学
基本粒子探测　　蛋白质核酸与酶
场论与粒子物理　　遗传与基因
粒子磁矩与固体磁性　　细胞生物学
超导超流与相变　　生理现象及机制
测量技术与精密计量　　内分泌与免疫
天体物理学　　临床医学与药物
物理学与技术　　传染病与病毒
热力学与反应动力学　　神经与脑科学
物质代谢与光合作用

在丛书策划基本成形后，我们曾到上海、北京、南京等地的许多著名高校及中国科学院、中国医学科学院等科研院所征求专家们的意见，得到了他们的大力支持。许多学者不顾事务繁忙，慨然为丛书撰稿。我们谨向他们表达由衷的感谢和深深的敬意。

2000年12月10日

作者简介

吴鑫基，男，1935年生，1962年毕业于北京大学地球物理系天文专业。北京大学天文系教授、博士生导师，兼任中国科学院射电天文联合开放实验室学术委员会委员、乌鲁木齐天文站客座研究员。曾任国家自然科学基金委员会天文学科评委、《天体物理学报》副主编、中国天文学会理事及高能天体物理专业委员会主任和北京天文学会副理事长等职。

温学诗，女，1948年生，1975年毕业于北京大学地球物理系天文专业。现任北京天文馆编辑室主任，《天文爱好者》杂志社社长，中国天文学会组织委员会副主任，北京博物馆学会学术委员会副主任。曾任北京天文学会秘书长等职。

图书在版编目(CIP)数据

宇宙佳音:天体物理学/吴鑫基,温学诗著.—上海:上海科技教育出版社,2001.9
(诺贝尔奖百年鉴)
ISBN 7-5428-2662-X

Ⅰ.宇…
Ⅱ.①吴… ②温…
Ⅲ.天体物理学-普及读物
Ⅳ.P14-49

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第047889号

目录

1

一门古老而年轻的科学

天体和宇宙

天文学是研究天体和宇宙的科学。它是一门具有悠久历史的古老学科，又是最具现代化的学科。概而观之，天文学由天体测量学、天体力学和天体物理学三大分支学科组成。

最先发展起来的是天体测量学。天象是人类最早认识的自然现象之一。在远古时代，人类在生活和生产活动中逐步积累了关于太阳、月亮以及一些亮星在天空中位置变化的知识。为了指示方向、确定时间和季节以及制定历法，天体测量学就发展起来了。早在14世纪以前，我国古代天文学家已研制出比较精确的仪器，可以比较准确地测量天体在星空中的位置。在西方，天文学家对行星运动的详尽观测研究，最终导致哥白尼(Nicholas Copernicus)于16世纪创立"日心说"。到今天，天体测量学依然具有生命力，观测手段已从光学观测发展到射电、红





外、紫外、X 射线和 γ 射线等波段，观测精度也已极大地提高。

天体力学是研究天体的运动、形状及其变化的学科，因此需要对天体进行更精确的测量。天文学家们通过长期的观测积累了有关太阳系中行星运动的大量资料，并逐渐掌握了行星运动的规律。牛顿(Isaac Newton)用力学理论来解释行星运动规律，发现了万有引力定律，从此诞生了天体力学。天体力学成为研究天体之间相互关系的学科。在牛顿以后的 300 年中，天体力学发展很快，特别是 20 世纪人造卫星、宇宙飞船上天和计算机技术的应用，大大推动了天体力学的发展。由于天体之间的相互关系以及它们的运动非常复杂，对应用数学工具的要求越来越高，从而也推动了数学的发展。

19 世纪中叶物理学的发展促进了揭示天体物理本质的新学科天体物理学的产生。天体物理学就是用物理学的基本原理来解释天体的形态、结构、物理性质、化学组成及其起源和演化的科学。最先发展起来的是测量天体的光度和光谱。到 19 世纪末 20 世纪初，物理学从经典物理过渡到现代物理，天体物理学也受到巨大的激励，几乎物理学的所有分支学科，如原子物理学、量子力学、原子核物理学、狭义相对论、广义相对论、等离子体物理学、固态物理学、致密态物理学、高能物理学等很快就成为天体物理学新的理论基础，并逐步形成相对论天体物理学、等离子体天体物理学、高能天体物理学、宇宙磁流体

力学、核天体物理学等分支学科。这样，天体物理学就成了物理学中的一个重要领域。1984年，国际纯粹及应用物理联合会正式设立天体物理学委员会。

天文学的研究对象包括太阳、太阳系、恒星、银河系、河外星系等及整个宇宙，不仅要研究它们的现在，还要研究它们的过去和将来，这样逐步形成以太阳系、太阳、恒星、银河系、河外星系、宇宙为研究对象的分支学科。只有一点例外，那就是我们自己居住的这颗行星——地球，通常被归为地学研究的范围。

太阳系是以太阳为主体的天体系统。太阳质量占太阳系所有天体总质量的99%以上，太阳强大的引力把太阳系内其他天体都牢牢地控制在自己的周围。地球只是太阳系的一个普通行星。它的直径约13 000千米，与太阳相距约1.5亿千米，每年绕太阳公转一周。太阳系内还有其他八颗大行星。这九大行星，按离太阳由近及远依次为水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星、冥王星。它们大致都沿着同一方向自西向东以椭圆轨道绕着太阳转动。水星离太阳最近时两者相距4600万千米。冥王星离太阳最远，轨道直径约120亿千米。

小行星是太阳系里较小的天体。第一颗小行星"谷神星"是1801年1月发现的，到2001年1月已经发现并获国际统一永久编号的小行星数已突破20 000大关。绝大多数小行星就像一块块大小不等、形状不一的"大石块"。它们大部分分布在火星





和木星的轨道之间。彗星也是较小的绕太阳运行的天体,它们的公转轨道是非常扁长的椭圆。当彗星运行到太阳附近时被阳光照射得十分明亮,而且生成彗尾,形如倒挂的扫帚。流星体是太阳系内更小的天体,大多数是直径只有10微米到几十厘米的尘粒和固体物质,也绕太阳转动。它们进入地球大气层时,由于运动速度很快,同地球大气的分子碰撞而发热、发光、燃烧,形成明亮的光迹。也有一些比较大的流星体,在大气中没有燃尽,落到地面上成为陨石。

太阳是一颗很普通的恒星,但它是地球上光和热的泉源,因而占有特殊的地位。我们肉眼看到的是太阳的光球层,温度约6000K。日面上经常出现黑子和耀斑之类的活动现象。在光球层外还有色球层和日冕。日冕以及太阳磁场可以延伸到极其广阔的行星际空间。

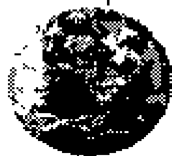
银河系中有数以千亿计的恒星、许许多多的弥漫星云和到处都有的星际物质。恒星的化学组成大同小异,质量的差别也不是很大,但大小和密度却十分悬殊。太阳的半径约为70万千米,红巨星的半径比太阳大数百倍甚至上千倍,是恒星世界中的庞然大物。恒星世界中的侏儒是白矮星和中子星,白矮星的半径仅约太阳的百分之一,和地球相当,中子星更小,半径仅约10千米。红巨星、白矮星和中子星的质量与太阳的质量差别不大,它们之间的密度差别却可达几个到十几个数量级。

许多恒星的光度会发生引人注目的变化。有些变星的光度变化是周期性的,周期从一小时到几百天不等,也有的可以长达好几年。还有一些恒星的光度发生突然的剧烈变化成为新星或超新星。大多数恒星并不孤单,有的恒星有行星系统相伴,有的则是成双成对的双星系统,还有好几颗星聚在一起的,组成聚星。几十颗、几百颗乃至上百万颗恒星聚在一起则形成星团。银河系中双星约占全部恒星的三分之一。

银河系中恒星主要集中在一个扁球状的空间范围内,侧面看去像一只中间突起、四周较薄的体育运动用的铁饼。这个大"铁饼"称为银盘,银盘的对称面叫银道面,直径约 8.5 万光年,中央突出的部分是核球,厚约 1 万光年。在大"铁饼"之外,还有一部分恒星稀疏地分布在一个圆球状空间范围内,形成所谓的银晕(图 1)。

银河系如此之大已是令人难以想象,但是在银河系之外还有许许多多同银河系类似、离我们非常遥远的庞大天体系统,称为河外星系。

河外星系也聚成大大小小的集团,有双重星系、多重星系以至由成百上千个星系组成的星系团。河外星系数以亿计,按它们的形态可以分为椭圆星系、旋涡星系和不规则星系等类型,此外还包括类星体、各种射电星系、赛弗特星系等"活动星系"。最远的河外星系与我们的距离超过百亿光年,对它们的观测使天文学研究的范围扩展到尺度达百亿光年的广





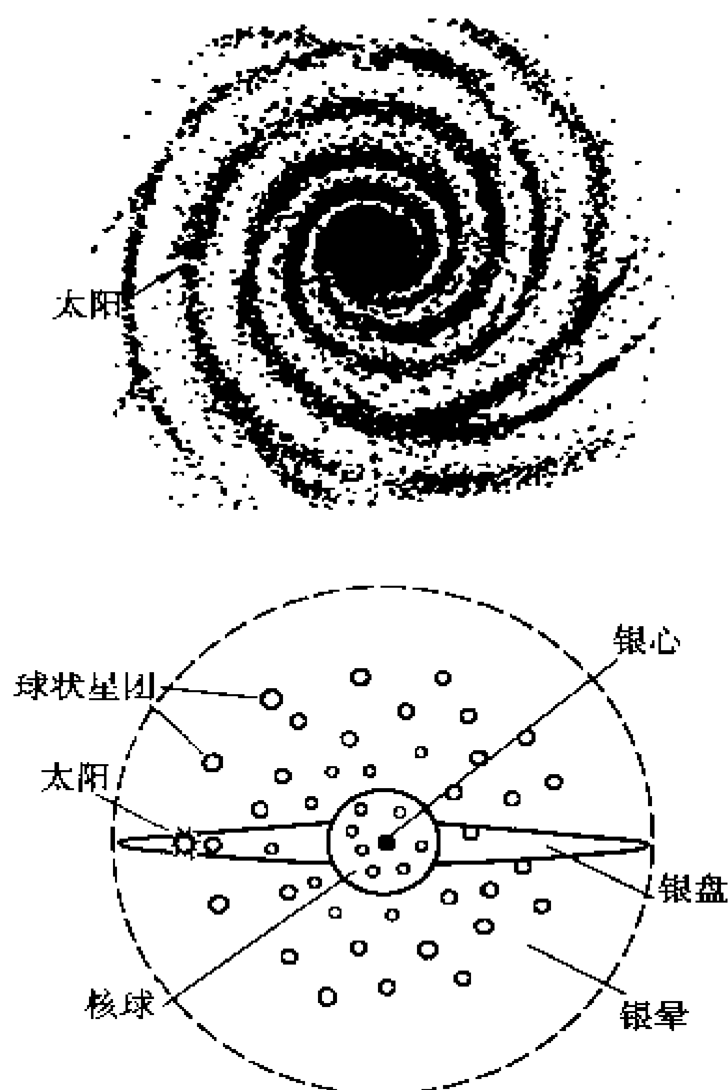


图1 银河系的结构.(上)俯视图,(下)侧视图

阔空间,并可追溯到百亿年以前发生的事件,成为现代宇宙学的重要支柱。

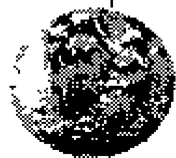
天文望远镜

观测是天文学研究的主要实验方法。人类基本上只能被动地接收来自宇宙空间天体发来的电磁波、高能粒子和引力波。而且,由于绝大多数天体离

我们极其遥远，到达地球的能量非常微弱，因而观测起来特别困难。浩瀚的宇宙所包含的天体不计其数，物理过程极其丰富，规模极其宏大，是地球上的任何实验室都比不了的。来自宇宙的信息永远是人类取之不尽的知识源泉。观测手段越多、越好，所能得到的信息就越丰富。正因为如此，天文观测技术总是在一浪超过一浪地不断发展。

天文学可按观测手段分为光学天文学、射电天文学、X 射线和 γ 射线天文学。还有一些小的分支，如红外天文学、紫外天文学、中微子天文学、引力波天文学等。光学天文学具有悠久的历史，以致在很长一段时间里它成了天文学的同义词。在 17 世纪之前，天文学家只能用肉眼观测星空中几千个比较亮的天体。17 世纪初伽利略(Galileo Galilei)发明了天文望远镜，人类的眼界随之大为开阔。20 世纪中叶，光学望远镜的口径已达 5～6 米，现今的光学望远镜口径更大，功能更强。如美国口径 10 米的凯克望远镜、美国 8.5 米光谱巡天望远镜、日本口径 8 米的昴星团望远镜和欧洲南天天文台 4 台 8 米口径望远镜组成的等效口径为 16 米的甚大望远镜。1990 年发射上天的哈勃空间望远镜，其口径虽仅 2.4 米，却因为摆脱了地球大气抖动的影响而独树一帜。光学望远镜不断改进，人类的视野便越来越广阔。

天体物理学的基本理论，诸如恒星大气结构和化学组成、恒星的内部结构和演化、星系的距离与其退行速度间的正比关系(即哈勃定律)等等，都是在





光学观测的基础上建立的。因此,我们可以说,光学天文学奠定了天体物理学的基础。

射电天文学是20世纪40年代第二次世界大战后迅速发展起来的天文学新分支,其特点是利用射电天文望远镜观测天体的无线电波段的辐射。和光学望远镜将近500年的历史相比,射电天文学还只有几十年,但是它却很快就步入了鼎盛时期。

20世纪60年代射电天文学的"四大发现",即脉冲星、星际有机分子、微波背景辐射和类星体的发现,成为20世纪中最具光彩的天文学成就。1967年发现射电脉冲星的休伊什(Antony Hewish),1974年发现射电脉冲双星的泰勒(Joseph H. Taylor)和赫尔斯(Russell A. Hulse),1965年发现宇宙微波背景辐射的彭齐亚斯(Arno Allan Penzias)和威尔逊(Robert Woodrow Wilson),分别获得1974年、1993年和1978年的诺贝尔物理学奖(见本书第3~5章)。星际有机分子的发现虽未直接获奖,但它们的发现与汤斯(Charles Hard Townes)获1964年诺贝尔物理学奖的项目直接相关。汤斯在1957年就预言星际分子的存在,列出17种可能存在的星际分子,1963年他又在实验室里测出羟基(OH)的两条处在射电频段的谱线。这些分子谱线位于厘米波和毫米波段,促进了毫米波天文学的诞生和发展。目前毫米波天文学的进展方兴未艾,并正随着仪器设备的创新,向亚毫米波段发展。

四大发现中惟一没有获奖的是类星体的发现。

其实,类星体的发现意义也是极其重大的,它揭示一种新型天体的存在,类星体巨大的红移和能源问题对天体演化和现有物理规律提出了挑战。但是,由于科学家们还没有最终弄清类星体的物理本质,近期内还不能期望它的发现者能获得诺贝尔物理学奖。

英国剑桥大学天文学家率先研制成功的综合孔径射电望远镜,是射电天文工作中首创的分辨率可以和光学望远镜媲美的高灵敏度成象设备。它的发明者赖尔(Martin Ryle)因此而荣获 1974 年的诺贝尔物理学奖(见本书第 2 章)。20 世纪 70 年代,在荷兰和美国相继建成大型综合孔径射电望远镜系统。美国的“甚大阵”(VLA)由 27 面直径 25 米的抛物面天线组成,设置在长各为 21 千米的三个臂上。“甚长基线干涉仪”(VLBI)的创立使射电望远镜的角分辨率一举超过了光学望远镜。这种干涉仪允许把基线做得非常长,例如与地球的直径相当,甚至可以把一面天线发射到太空中以获得更长的基线,从而实现更高的分辨率。20 世纪 90 年代,美国建成的由 10 台口径 25 米射电望远镜组成的甚长基线阵(VLBA)、印度建成的由 30 个口径 45 米的抛物面天线组成的巨型米波射电望远镜阵、位于美国墨西哥州的由 40 台口径 8 米的天线组成的毫米波阵列望远镜,以及欧洲甚长基线干涉网、英国多元微波联接干涉网等,分辨率都超过了千分之一角秒。20 余年来,综合孔径系统和甚长基线干涉仪的观测取得了





累累硕果，包括发现巨大能量的射电星系、类星体、喷流现象、“视超光速”运动等。

由于地球大气只允许可见光和射电波通过，天文学家要想观测天体的红外、紫外、X射线、γ射线等电磁波，只能到大气层外的空间中去。20世纪40年代，由火箭携带探测器进行探测开启了空间天文学时代。空间技术已由初期利用气球、火箭或飞机发展到利用卫星、宇宙飞船和空间实验室进行天文观测的时代。其中最重要的是X射线和γ射线的观测。20世纪90年代有康普顿γ射线空间天文台，新一代γ射线望远镜，伦琴X射线天文卫星，多镜面X射线望远镜，钱德拉X射线天文台等。崭新的X射线天文学和γ射线天文学发展迅速，新发现层出不穷，发现了像X射线双星、致密天体的吸积和喷流、γ射线脉冲星和γ射线暴等重要天体和新现象。

天文学与物理学

20世纪初，物理学家根据物理学规律提出了许多天文学预言：如广义相对论预言光线在太阳引力场中的弯曲、水星近日点的运动和引力场中的光谱线红移现象；预言中子星、微波背景辐射和黑洞的存在等。在证实这些预言的过程中，天文学家走过了艰难的历程。这些伟大的预言推动着天文学和物理学的发展，并形成了一个个新的分支学科。

天文观测为物理学提供了在地球上实验室无法得到的物理现象和物理过程。开普勒(Johannes Kepler)发现行星运动三定律以后,牛顿为解释这些经验规律导出了万有引力定律;在地球上的物理实验室中是总结不出万有引力定律的。对太阳光谱的研究导致了发现太阳上存在氦元素,然后人们才在地球的实验室中找到了氦。对太阳及恒星内部结构和能量来源的研究导致了热核聚变反应的概念;对星云谱线的分析提供了原子禁线理论的线索;对恒星演化的详尽研究又导致了元素形成理论等。天文学观测的新发现给物理学以巨大的刺激,如中子星的发现推动了致密态物理学的发展;类星体、活动星系核、γ射线暴等的能量来源还难以从现有的物理学规律中找到确切的答案;太阳中微子的观测数据和物理理论预期值相去甚远等问题也都在向物理学提出挑战。

随着物理学的发展,物理学家必然要把宇宙及各种天体作为物理学的天然实验室。例如,中子星就提供了超高密、超强磁场、超强压力、超高温和超强辐射等极端物理条件。在宇宙中所发生的物理过程远比地球上所能发生的多得多。许多在地球上做不到的物理实验,在宇宙中可以找到,因此物理学家涉足天文学研究已成为必然。天文学家也密切注视物理学的发展,希图用物理学的原理来解释我们的宇宙的过去、现在和将来。阿尔文(Hannes Olof Gösta Alfvén)创建宇宙磁流体力学,钱德拉塞卡





(Subrahmanyan Chandrasekhar)创建恒星结构和演化理论，福勒(William Alfred Fowler)创建恒星化学元素形成理论，都各自开辟了一门新的分支学科，成为天体物理学的基本理论。可以说，他们的研究成果是物理学和天文学的完美结合。他们也因此分别获得了诺贝尔物理学奖(见本书第6～8章)。

虽然天文观测的绝大部分信息是从接收天体的电磁波辐射而获得的，但宇宙线、中微子和引力波也是获得宇宙信息的重要窗口。天文学家和物理学家都热中于对宇宙线、中微子和引力波的观测，目的都是为了获得来自宇宙空间天体的信息以验证物理学规律，因此这些工作既是天文学的观测也是物理学的实验。1936年，奥地利物理学家赫斯(Victor Franz Hess)因发现宇宙线而荣获诺贝尔物理学奖。他于1911～1912年用气球把“电离室”送到离地面5000多米的高空，进行大气导电和电离的实验，发现了来自地球之外的宇宙线。这是物理学实验，也是天文学观测，物理学和天体物理学已融为一体。美国物理学家贝特(Hans Albrecht Bethe)因核反应理论的研究而荣获1967年诺贝尔物理学奖。这一研究对天文学的贡献也是巨大的。1938年，他提出太阳和一般恒星的能量来源理论，认为太阳中心温度极高，太阳核心的氢核聚变生成氦核，释放出大量的能量，成为太阳光和热的源泉。这种学说如今也已成为天体物理学的基本理论之一。

天文学和诺贝尔物理学奖

诺贝尔奖自1901年首颁至今已经整整100年，在前70年中天文学与诺贝尔物理学奖基本无缘。其实，在这70年中，天文学界还是有不少能与后来获得诺贝尔奖的项目相媲美的成就和天文学家的，例如创立了赫罗图的赫茨普龙(Ejnar Hertzaprung)和罗素(Henry Horris Russell)，发现哈勃定律的哈勃(Edwin Powell Hubble)等。

揭开恒星演化之谜，乃是20世纪天文学最伟大的成就之一，而"赫罗图"的创立对此起到了非常重要的作用。赫罗图是20世纪初期由丹麦天文学家赫茨普龙(Ejnar Hertzsprung)和美国天文学家罗素(Henry Horris Russell)各自创立的。这种图的横坐标代表恒星的光谱类型(或色温度)，纵坐标代表恒星光度，故又称恒星的"光谱—光度图"。在赫罗图上，绝大多数恒星位于从左上端延伸到右下端的一条斜带内，这条斜带叫做"主星序"，位于主星序内的恒星叫做"主序星"。在主星序的右上方另有一条较松散的横带，其中散布着"巨星"，它们的光度要比光谱类型与之相同的主序星高得多。主星序的左下方分布着一些因温度高而呈白色、但光度却很小的恒星，即"白矮星"。赫罗图对恒星进行科学分类，成为研究恒星演化问题的极重要的工具，图上的不同区域代表着恒星的不同年龄：主序星上的恒星正处于青壮





表1　获诺贝尔物理学奖的天文学项目

编号及获奖年代	获奖者及获奖时年龄	取得获奖成果的年龄	获奖成就	附注
(1) 1970	[瑞典]阿尔文 62岁	30～40岁	创建太阳磁流体力学和宇宙磁流体力学	与另一项目分享
(2) 1974	[英国]赖尔 56岁	42岁	发明综合孔径射电望远镜，观测极其遥远的射电星系	与项目(3)分享
(3) 1974	[英国]休伊什 50岁	43岁	发现脉冲星，并证认为中子星	与项目(2)分享
(4) 1978	[美国]威尔逊 42岁 [美国]彭齐亚斯 45岁	29岁 32岁	发现宇宙微波背景辐射，支持大爆炸宇宙学	与另一项目分享
(5) 1983	[美国]钱德拉塞卡 73岁	20岁开始、多年成果	恒星结构和演化理论，确认白矮星质量上限	与项目(6)分享
(6) 1983	[美国]福勒 72岁	46岁	创建恒星演化过程中的化学元素形成理论	与项目(5)分享
(7) 1993	[美国]赫尔斯 42岁 [美国]泰勒 52岁	23岁 33岁	发现第一个射电脉冲双星和间接验证引力辐射	

年时期，红巨星是已经进入老年的恒星，白矮星则是处于临终阶段的垂死恒星。绝大多数恒星都分布在主星序上，正好说明大多数恒星都处在青年和壮年时期。

关于哈勃定律，本书在第5章中还将进一步介绍。在今天，几乎已经没有人怀疑，赫罗图和哈勃定律乃是“诺贝尔奖级”的重大科研成果。但在当时，天文学和物理学之间相互渗透尚不充分，天文学家与物理学家之间的交流、理解也有欠缺。物理学家对天文学的理解和重视需要有一个过程。

以天文学研究成果为主获得诺贝尔物理学奖，可以说以1970年为起点。随着天文学与物理学各个分支之间的渗透逐步加强，天体物理学的一些突出成果大大推进了物理学的发展，因此取得杰出成就的天文学家屡屡荣获“诺贝尔物理学奖”也就很自然了。在20世纪最后的30年中，天文学家获诺贝尔物理学奖不仅实现了零的突破，而且在物理学奖中占的比例还比较高：在5个年度有7项物理学奖授予9位天文学家。

从上表所列的获奖项目可以看出：全部7项获奖项目中与射电天文学直接有关的多达4项共6人，反映了新兴学科领域的强大生命力。这7个获奖项目与物理学理论和实验的关系非常紧密，只有赖尔发明综合孔径射电望远镜是纯粹的天文项目。这一事实既表明当代天体物理学在整个物理学中已具有举足轻重的分量，也表明物理学家对天体物理





学之重要性的认识已大为深化。

从取得成果到获奖,时间间隔最短的是休伊什发现脉冲星的奖项,但也有7年。任何一项研究成果都需要经受时间的考验,每项成果本身也需要完善和发展。如果仅是发现脉冲星,而不能证认为理论预言的中子星,那是不可能获得诺贝尔物理学奖的。脉冲星发现后,不仅休伊什在将脉冲星证认为中子星方面有重要贡献,其他天文学家也作出了贡献,甚至是更重要的贡献。脉冲星的发现开辟了一个崭新的学科领域,许许多多的天文学家和物理学家都被吸引来从事脉冲星的研究。钱德拉塞卡在73岁高龄时获奖,则是对他几十年研究工作的总评价。天文学研究需要有长期的计划和系统性的研究。

大多数获奖者都是在比较年轻的时候取得获奖成果。9位获奖者中,33岁以前取得获奖成果的有6人。他们的获奖并不仅仅是因为年轻气盛,敢于冲破传统观念,还在于他们从事的研究工作,都是当时最前沿的原始性、创新性的课题。他们都具有自强不息、拼搏奋进,不达目的誓不罢休的精神。赫尔斯取得获奖成果时是23岁,还是一位在学的博士生。他的导师泰勒那时也只有33岁,但他已是继休伊什和乔斯林·贝尔(Jocelyn Bell)发现4颗脉冲星后第5颗脉冲星的发现者。赫尔斯要完成的博士论文是当时灵敏度最高的脉冲星巡天。在钱德拉塞卡的研究成果中,最有光彩的"白矮星质量上限"是他在20来

岁的学生时代完成的,他当时生活在物理学发生重大变革的时期,用现代物理学的概念和理论来研究天文学问题取得了巨大成功。当时曾流传着青年学生钱德拉塞卡与赫赫有名的天文学家爱丁顿(Authur Stanley Eddington)辩论并获胜的佳话。

在天文学获奖项目中,多半与射电天文学有关。下面就从综合孔径射电望远镜谈起。



2

综合孔径射电望远镜

射电天文学的萌生

地球大气有两个“窗口”,分别允许来自天体的可见光和无线电波通过而一直到达地面。天文学家把天体的无线电波称为射电波。天文学家只是从几十年前才开始利用射电波段这个“窗口”,原因是人们很晚才知道天体也辐射这个波段的电磁波。射电天文这种新的观测手段一出现,就显示出极大的优越性。射电波可以穿过光波透不过的尘雾,可以观测光学望远镜观测不到的天区。

20世纪30年代初,美国贝尔电话实验室的央斯基(Karl Guthe Jansky)发现银河系中心发射来的无线电波。1937年,美国射电天文学家雷伯(Grote Reber)研制成直径9.45米的抛物面天线射电望远镜并用它证实了上述发现。第二次世界大战期间,因战争需要,雷达和反雷达技术以及通讯技术迅速发展。英国的海伊(James Stanley Hey)对一起干扰英国军用





雷达的重大事件进行分析后发现,太阳上发生的射电爆发是这一事件的罪魁祸首。雷达对无线电信号非常灵敏,因此有很多机会接收到来自天体的射电辐射,包括银河系中心的射电辐射、太阳射电爆发以及流星遗迹的雷达回波。后来发展起来的射电望远镜在原理和技术上与雷达非常相似。因战争需要发展起来的雷达技术为射电天文学的发展准备了条件。战后,一些雷达科技人员把雷达技术用于射电望远镜的研制,开始天文观测研究。赖尔就是其中最杰出的代表。

赖尔 1918 年 9 月 27 日生于英格兰萨塞克斯郡的布莱顿,祖父是一位业余天文爱好者,拥有一架口径 8.9 厘米的折射望远镜,幼年的赖尔就喜爱上了天文学。中学时他对无线电这门新兴的学科产生了浓厚的兴趣,成为业余无线电爱好者。后来赖尔进入牛津大学攻读物理,1939 年,他一毕业就到卡文迪什实验室从事雷达天线的研制。第二次世界大战期间,赖尔应征入伍。他的无线电专长帮助他立下了战功,他先加入英国空军部研究所,后转电讯研究所,曾从事研制波长 1.5 米机载拦截雷达天线系统,研制厘米波雷达的测试设备,还参与用于鉴别敌我飞机的机载雷达应答器的研制,干扰德国预警雷达的发射机的研制等。

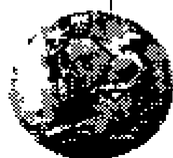
第二次世界大战结束后,赖尔回到剑桥大学卡文迪什实验室。那时,刚刚发展起来的射电天文显得十分幼稚,他面临巨大的困难,但也获得了绝好的

机遇，他从事的是一项开创性的研究工作，一项开辟新领域的工作。

射电望远镜的崛起

射电天文学以无线电接收技术为观测手段，观测对象遍及所有天体。射电天文学面临的最大困难是射电望远镜的分辨率远不如光学望远镜。天文观测不仅要求接收到天体的辐射，还要能看清天体的细节，也就是要求有很高的空间分辨率。射电望远镜常用的抛物面天线是有方向性的，来自天体的射电波经抛物面天线反射后会聚到焦点，放置在焦点处的"馈源"收集射电波，并把它们传输到接收系统。这类射电望远镜只能接收到来自主轴方向附近一个角度的电磁波，这个角称为分辨角。分辨角越小，分辨率就越高。

无论是光学天文望远镜还是射电天文望远镜，它们的分辨角 θ 都和波长 λ 成正比，和望远镜的口径 D 成反比，即 $\theta = 1.22\lambda/D$，式中的单位是弧度。单天线射电望远镜的分辨角远大于光学望远镜，其主要原因是光学波段的波长远比射电波段短。目前天文爱好者拥有一台口径 10 厘米的光学望远镜并不是难事，当观测波长为 550 纳米(5500 埃)时，分辨角为 1.4 角分；而一台射电望远镜，当观测波长为 5.5 厘米时，分辨角要达到 1.4 角分，射电望远镜天线的口径就必须达到 10 千米，比光学望远镜的口径



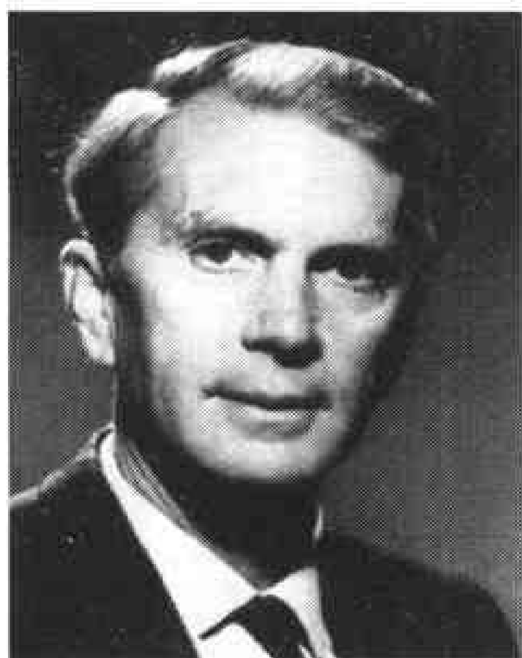


大10万倍。而且，还要求抛物面天线的表面精度达到3毫米，也就是要达到波长的1/20。今天，如此大的口径和如此高的精度都还无法做到。美国1990年发射的哈勃空间光学望远镜的分辨角可达0.1角秒。如果射电望远镜要达到这样的分辨角，那就要把抛物面天线做成8400千米那么大，还要求抛物面相对于理想形状只能有几毫米的误差。这更是天方夜谭中的神话故事了。

射电天文学家要使射电望远镜的分辨率达到、甚至超过光学望远镜的"梦想"能实现吗？赖尔的先驱性研究为实现这一目标奠定了坚实的基础。

初期的射电望远镜的口径都比较小，观测受到角分辨率低和灵敏度有限两者的严重限制。由于分辨率低下，不能把相邻的细节分辨清楚，就不可能得到一个射电源结构的信息。20世纪20年代，光学天文已经很发达，已有像美国威尔逊山天文台的2.54米口径光学天文望远镜，用这台望远镜巡天观测，所获得的天体位置信息极其丰富。射电望远镜观测到新射电源后，第一件事就是要寻找它有没有光学对应体，以便进一步了解它们的性质。但是，由于当时的射电望远镜的分辨能力太差，分辨角只能达到几角分甚至几度。在这个空间范围内包含了许多光学天体，根本无法确认与其中的哪一个对应。只有当射电望远镜的分辨能力达到角秒级时，寻找光学对应体的工作才能进行。

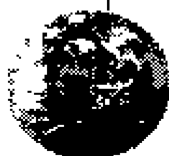
为了提高射电望远镜的分辨率，赖尔开始研制



赖尔

射电干涉仪。干涉仪一般由两面天线组成，相隔一定距离的天线放置在沿东西方向的基线上，用长度相等的传输线把各自接收到的信号输往接收机并相加。来自“射电点源”的单频信号不能同时到达两面天线，而要相差一段路程。若这段路程差正好是半波长的偶数倍，两面天线接收到的信号同相相加，因而信号增强；若路程差是半波长的奇数倍，信号便相互抵消。天体的周日运动导致到达两面天线的路程差不断地变化，信号到达两面天线时的相位差随之不断改变，接收机的输出呈现强弱相间的周期性变化，形成干涉图形。对干涉仪来说，分辨角的公式依然是 $\theta=1.22\lambda/D$，但这里的 D 已不是单个天线的直径，而是两面天线之间的距离了(图 2)。来自射电点源的单频信号不能同时到达两面天线，而有一段路程差(BC)。当这段路程差正好是波长的整数倍时，两面天线接收到的信号同相相加，信号增强。若路程差是半波长的奇数倍，则信号相互抵消。分辨角不再由单天线的口径决定，使得天文学家有可能利用小口径的天线获得高分辨能力。这是一次革命性的变化。

1946 年，赖尔利用他研制的射电干涉仪观测太





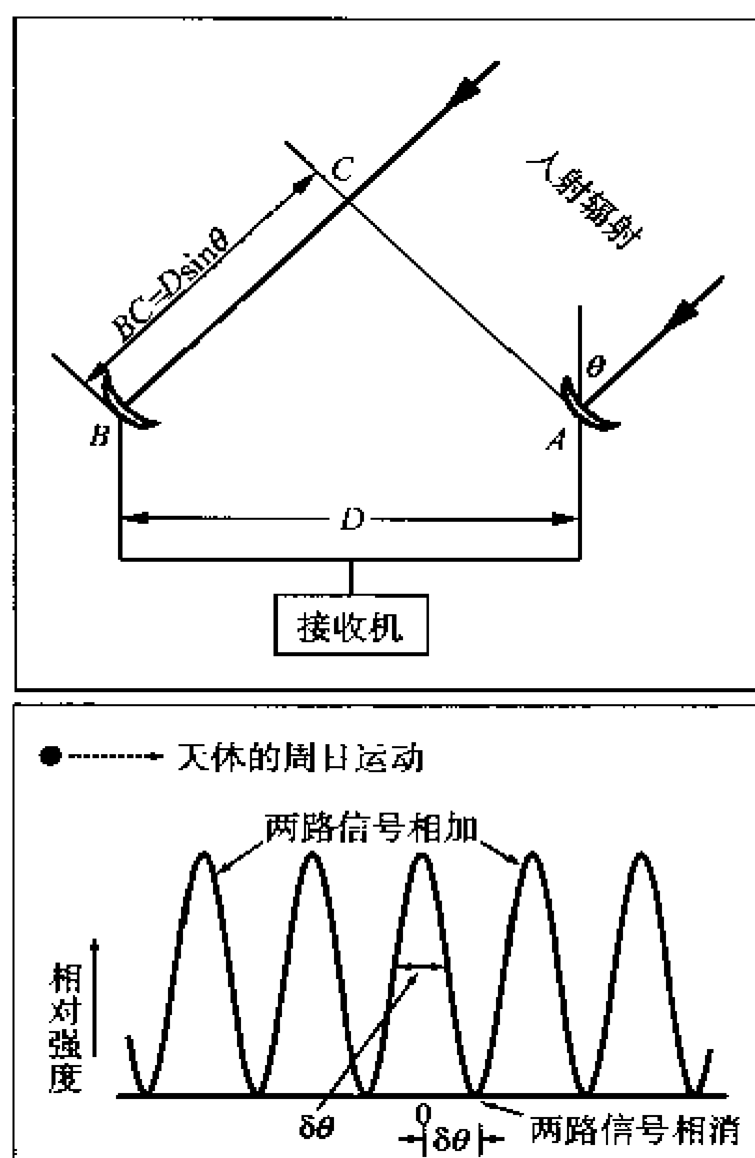


图 2　射电干涉仪原理图

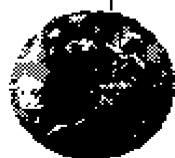
阳，虽然单天线的分辨角比太阳的角径还大，但干涉仪的分辨率已大大提高，可以分辨出太阳上的局部辐射源。他通过观测发现太阳黑子和耀斑是强大的米波射电源。1948 年起赖尔用改装后的 80 兆赫频率太阳干涉仪观测射电源天鹅座 A，给出了这个源的结构图，后来，又用这台干涉仪发现了射电源仙后座 A。

按照干涉仪的原理，如果我们能够使两面天线的间距达到几千千米，甚至几万千米，那么分辨率就可以提高几万倍，甚至几十万倍。这个美妙的“梦想”现在已经由甚长基线干涉仪实现了。增加天线间距的最大困难是不仅需要特别多的馈线，而且由于馈线性能受环境温度等因素的影响而发生变化，无法实现同相位相加。这个难题推动了甚长基线干涉仪的研制。

甚长基线干涉仪由两面相距特别遥远的天线组成，干脆取消连接两个天线间的馈线，应用极端稳定的原子钟控制两个独立本振的频率，并记录下信号到达的准确时间。由于两地的射电望远镜本振严格相同，观测记录上有准确时间的标记，把两台射电望远镜的磁带记录送到处理机中进行相关运算，效果便与有馈线射电干涉仪同相传输后相加完全相同。

化整为零的战略战术

早期射电望远镜最大的缺憾是不能像光学望远镜那样给出射电源的图象。单天线射电望远镜给出铅笔束状的方向图，如果束宽比射电源小很多，就可以用逐点观测的方法把这个射电源的强度分布画出来。但是，一般单天线的分辨角比较大，只能给出非常粗略的射电强度分布。由两面或多面天线组成的射电干涉仪和甚长基线干涉仪可以达到很小的分辨角，但只有一维的分辨率，如观测太阳只能确定日面





上的局部源所处的经度，而不能得到局部射电源的二维图象。射电天文学家的追求是希望射电望远镜也能像光学望远镜拍摄天体照片那样给出天体的射电图象，在射电天文发展的初期，赖尔就把实现射电天文学家的这一梦想作为自己的奋斗目标。

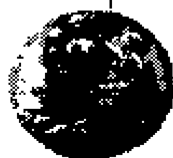
1948年以后，赖尔把观测研究目标从太阳转向太阳系外广阔的空间，期望搜索到更多的射电源。他在应用干涉仪观测太阳等目标时，已积累了丰富的实践经验，发现了双天线干涉仪的不足。以赖尔为首的射电天文学家，提出用"孔径综合"技术来解决射电望远镜的高分辨率、高灵敏度和成象能力等一系列难题。

孔径综合方法的基本思想极其简单，即化整为零。它至少要有两面天线，也就是双天线干涉仪。不同的是，其中一面天线固定，以它为中心，画一个圆，等效于一个"大天线"，另一面天线可以移动，逐次放到"等效大天线"的各个位置，每放一个地方进行一次射电干涉测量。这也可以由许多天线来实现，几面固定，几面移动，甚至全部都固定。不管何种结构，都要求测量得到"等效大天线"上所有方向和各种距离间隔上的相关信号，利用各种间距取向的干涉仪测量资料，通过傅里叶变换，就可以求得天空射电亮度的二维分布，也就是得到了被观测天区的射电天图。综合孔径射电望远镜的优点是不需要制造口径特别大的天线，用两面或多面小天线进行多次观测即可达到大天线所具有的分辨率和灵敏

度，而且得到的是所观测天区的射电天图。

1952年，赖尔提出形如英文字母T的综合孔径方案。1954年，布莱思(J.Blythe)按照这一思想在剑桥大学建造了第一台综合孔径射电望远镜。它由一整排小单元构成的一字形单元和一个可在38个不同位置上移动的小单元组成，由此可以成为一个相当于正方形"大天线"的综合孔径望远镜。在波长为7.9米上给出的分辨角为2.2度。剑桥的天文学家用人类历史上这第一台综合孔径射电望远镜得到了第一批银河辐射的图象。虽然，2.2度的分辨角不可能获得精细的分布图，但是，这项观测证实了孔径综合原理的正确性，意义非凡。从此，射电天文学的又一个时代开始了。

综合孔径射电望远镜最大的问题是工作量太大。"等效大天线"越大，要测量的次数也越多。怎样才能减少观测次数提高综合孔径望远镜的效率呢？赖尔通过进一步研究，终于弄清楚，可以利用地球自转效应。设想从射电源上观看地球上北极附近的双天线干涉仪的两个天线，在地球自转过程中，两个天线之间也在作相对运动。地球自转一周，其中一个天线将绕着另一个天线描绘出一个圆路径。地球自转一周相当于把可移动天线逐次地放到"等效大天线"的各个方向上，利用地球自转效应，可以大大简化综合孔径的观测，只需解决沿东西方向上各个单元之间不同间距问题。这样就把二维问题简化成了一维问题。实际上，由于系统的对称性，只需要





12小时就能完成一组观测(图3)。图3的上图显示在地球自转过程中两个天线之间也在作相对运动;下图中A、B两天线放在东西方向固定,B天线可以移动。将B天线逐次放到A、B连线的各个位置上,利用地球自转效应,每次进行12个小时的射电干涉测量,就可以求得天空射电亮度的二维分布。

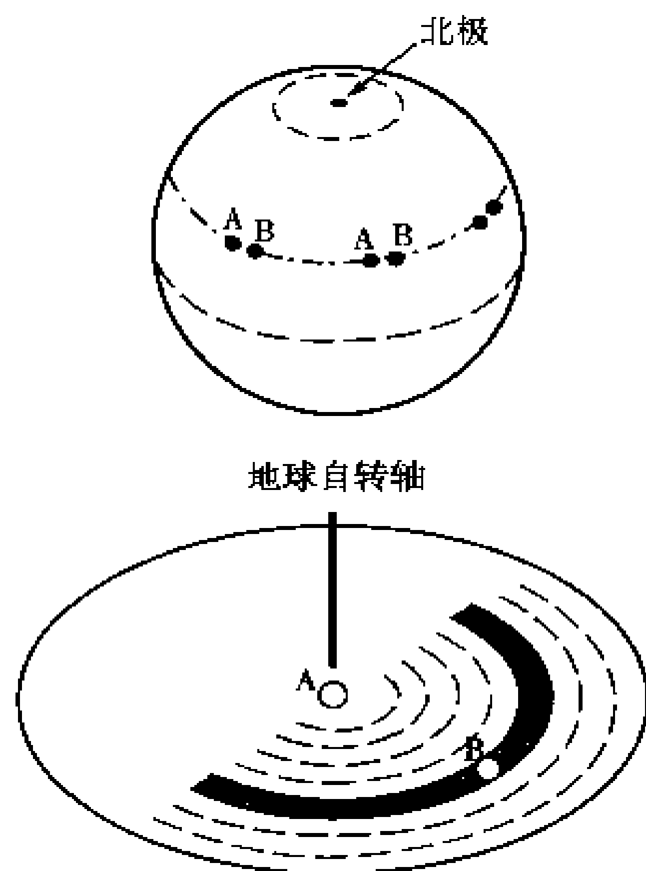


图3 地球自转综合孔径射电望远镜原理图

观测也不只限于天极附近的射电源。假若这些小天线单元位于东—西轴线上,而每个单元又能对待测天区跟踪12小时的话,那么对于赤纬 δ 较低的天区而言,综合设备就变成了椭圆形——南北方向的口径缩小了 $\sin\delta$ 倍。地球自转效应的应用大大节

省了天线移动的次数，也大大减少了占地面积。最初的综合孔径射电望远镜也就发展成地球自转综合孔径射电望远镜了。

剑桥大学的骄傲

孔径综合原理在1954年已由实验证实是正确的，但直到20世纪60年代，剑桥大学才陆续建成3台综合孔径射电望远镜，它们的等效口径分别为0.8千米、1.6千米和5千米。其主要原因是综合孔径射电望远镜的观测数据特别多，计算量特别大，在50年代还没有容量足够大、计算速度足够快的计算机来完成资料的傅里叶变换。20世纪60年代，随着计算机的发展，综合孔径射电望远镜的发展才有了可能。

在1960~1961年，赖尔和内维尔(Ann Neville)开始研制等效口径1.6千米的综合孔径射电望远镜。它由3面直径18米的抛物面天线组成，其中2面相距0.8千米，是固定的。另1面天线放在长0.8千米的铁轨上，可以移动。结果得到了4.5角分的分辨率。这项实验的成功一方面证明利用地球自转进行综合的方法是可行的，观测的工作量大大减少；另一方面望远镜的灵敏度又一举提高8倍之多。这次观测实验的天区较小，仅约50平方度。1964年这台望远镜正式启用，用于普测射电天图和研究弱射电源，特别是射电星系的结构。





1971年,剑桥大学建成等效口径5千米的综合孔径射电望远镜,代表了当时最先进的设计。它们由8面口径为13米的抛物面天线组成,排列在5千米长的东西基线上,4面天线固定,4面可沿铁轨移动。每观测12小时后,将天线移动到预先计算好的位置上再观测12小时,以获得各种不同天线间距的资料。经计算机处理资料后,便得到一幅观测天区的射电图。这台望远镜是专为绘制单个射电源的结构而设计的,它除了有更大的综合孔径外,各个抛物面也更加精密,容许在短至2厘米的波长上工作,结果得到的角分辨率数量级为1角秒,这已经可以和高山天文台站上的大型光学望远镜媲美了。

剑桥大学综合孔径望远镜被用于广泛的天文研究课题,主要研究任务有二:其一是巡天,希望发现比较暗弱、比较远的射电源,以揭示宇宙演化早期历史;其二是希望得到一些延展射电源——通常称为展源——的射电图。剑桥大学在通过射电巡天发现射电源方面作出了重大贡献,他们发表的编号为1C、2C、3C……的射电源表最为有名。随着高灵敏度和高分辨率的综合孔径系统的应用,射电巡天不断往深空发展,观测到了越来越弱、越来越遥远的射电天体。如今,大多数射电源都已获得光学认证。在对3C源进行光学认证的过程中,导致了天文学上极其重要的类星体的发现。在得到射电展源的二维图象方面,综合孔径望远镜更是取得骄人的成果。

至今,综合孔径射电望远镜仍有强劲的发展势

头。在 1954 年,第一具综合孔径望远镜提供了分辨率 2.2 度的射电天图;而 1971 年 5 千米综合孔径则有了分辨率为 2 角秒的射电天图。美国国家射电天文台的甚大阵是当前最大的综合孔径射电望远镜,由 27 面直径 26 米的可移动抛物面天线构成,它们沿臂长为 21 千米的 Y 形基线放置,其最高分辨角为 0.13 角秒,已经优于地面上的大型光学望远镜。若将甚长基线干涉仪原理和综合孔径原理结合在一起,可使等效综合口径达到数千千米,从而成为一具粗略的综合孔径射电望远镜。当今的甚长基线干涉观测网就是这样的望远镜。它由分布在世界各地的大、中型射电望远镜组成,其基线特别长,分辨率极高。但是想在这个等效大天线的大圆面上布满天线是不可能的,因此只能进行比较粗略的综合。参加这个网的射电望远镜越多,分布越合理,则该甚长基线干涉仪网所综合的图象质量就会越高。

射电天文学的重大突破

综合孔径是赖尔对射电天文观测技术的重大贡献,它为射电天文学各项新发现、宇宙学及射电源物理学等诸多开创性研究奠定了基础。剑桥综合孔径射电望远镜的优势有三:一是灵敏度高,可以观测遥远的射电源,比当时光学望远镜能看到的源远得多;二是分辨率已摆脱射电望远镜远不如光学望远镜的窘境,已能和当时的大型光学望远镜媲美,从而使寻





找射电源的光学对应体变得很容易了;三是能够给出射电展源的二维图象,使射电天文观测能和光学天文观测并驾齐驱。

5千米综合孔径射电望远镜被用于广泛的天文研究计划,从银河系中电离氢云到遥远的类星体。对于恒星形成区的观测,利用射电手段比使用光学望远镜更有效。当一团尘埃—气体云凝聚形成恒星时,新形成的恒星连同它们周围的电离氢区被弥漫的尘埃所包围,以致光学望远镜只有在这些尘埃消散之后,才能看到新诞生的恒星。而在射电波长上,尘埃不会对射电波有任何明显的吸收,因而射电观测可以研究这些区域的最初形成阶段的恒星。

用5千米综合孔径射电望远镜还描绘了天鹅座A射电源的图象(图4)。它由两个遥遥相对的射电展源组成,在它们之间还有一个致密的点源。业已

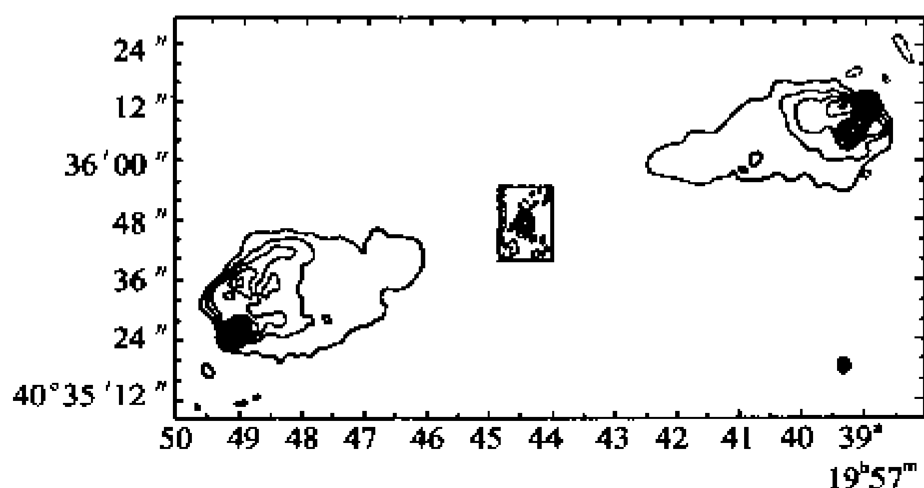


图4 1974年剑桥大学5千米综合孔径射电望远镜在5吉赫频率上观测天鹅座A射电源,首次给出射电双源及中心致密源结构

发现一批这样的射电源，它们都是处在银河系之外的河外星系。两展源之间的点源是星系核。图象的细节使我们可以引出一些重要的结论：星系核连续地向两个展源提供能量。

综合孔径的发明使天文学家的观测范围从大约10亿光年扩大到了100亿~200亿光年，几乎达到宇宙的边界，或追溯到宇宙的原初时期。这对宇宙学的研究至关重要。多数天文学家赞同的大爆炸宇宙论认为，星系是在宇宙演化的某个阶段形成的，在这个阶段之前，没有星系，在这个阶段之后，由于宇宙的膨胀，星系的密度在减小，星系的演化则使其亮度在不断地减小。根据这一理论，宇宙发展的各个时期的图景是完全不同的。与此相反，另有一种宇宙理论却认为，星系的空间密度不随时间变化，在宇宙中处处都是新的星系和老的星系混合在一起，从而保持密度不变。怎样证明孰是孰非呢?

研究宇宙的演化就好像对宇宙进行考古。如果我们能有宇宙各个时期的"照片"，特别是早期的照片，一看就会明白，星系的分布是否随着时间变化。在地球上，考古学家是通过挖掘古代遗物、化石等来确定年代和当时的自然、社会等情况的。在宇宙中能不能找到这样的"化石"?

我们知道，天体的辐射以光速传播，非常快。可是天体离我们太遥远了，光传播到我们这里要花非常多的时间。离太阳系最近的恒星发出的光，要在太空中旅行4.3年才能抵达我们的地球。离我们最





近的河外星系——大麦哲伦云的距离是16万光年，仙女座大星云的距离是220万光年。类星体离我们更远，我们接收到的是它们几十亿年甚至100多亿年前发出的光。宇宙微波背景辐射是最古老的辐射，它们是在宇宙年龄只有40万年时形成的。宇宙演化的各个时期都有遗留物，当今天文学观测所接收到的信息源自宇宙诞生后不久直到现在的所有各个历史时期。

剑桥大学综合孔径望远镜已能观测到远在100亿光年以外的天体。这也就是说，它能获得宇宙100亿年以前的天体"照片"。赖尔等人从1950年起进行巡天观测，发现了非常多的射电源，他们把观测发现的射电源编制成10多个射电源表。对这些射电源资料进行分析后，赖尔发现射电源的数密度随距离的增加而增多，但当距离大到一定程度以后，射电源的数密度又开始减小。这说明星系只在宇宙演化的某个阶段才会大量地产生。在100多亿年以前，宇宙中的射电源密度比近期的大得多，最大值可达现在的1000多倍。这一观测证明宇宙是随时间的推移而变化着的，今天的宇宙不同于过去的宇宙。赖尔的研究工作成为支持大爆炸宇宙学的重要观测事实。

1974年，赖尔和休伊什分享了当年的诺贝尔物理学奖。赖尔之所以获奖，是因为他在射电天文学技术和观测方面的开创性研究。如前所述，他发明的综合孔径射电望远镜是射电天文技术发展的一个

标志性事件。这一新型射电望远镜大大提高了空间分辨率和灵敏度。灵敏度的提高使其观测范围几乎扩展到了宇宙的边界，从而使天文学家得以追溯宇宙的早期历史。而分辨率的提高，特别是成象技术，使射电望远镜可以与光学望远镜相媲美，从而获得天体的高分辨射电图象。赖尔在射电天文观测技术、射电宇宙学和射电物理学等方面作出大量的创造性贡献，使英国的射电天文学研究长期处在世界领先地位。1984 年 10 月 14 日，赖尔在剑桥大学因病去世。



3

脉冲星和中子星

中子的发现和中子星的预言

脉冲星是20世纪60年代天文学的四大发现之一。脉冲星的发现证实了中子星的存在。中子星具有和太阳相当的质量，但半径只有10千米，因此具有非常高的密度，成为一种典型的致密星。中子星还具有超高压、超高温、超强磁场和超强辐射的物理特性，成为地球上不可能有的极端物理条件下的空间实验室。脉冲星的发现，不仅为天文学开辟了一个新的领域，而且对现代物理学的发展也产生了重大影响，它导致了致密态物理学的诞生。

英国天文学家休伊什教授和他的研究生乔斯林·贝尔女士一起发现了脉冲星，在宇宙中找到了物理学家和天文学家梦寐以求的中子星。休伊什因发现脉冲星并证认为中子星而荣获1974年的诺贝尔物理学奖。

那么，究竟什么是中子星呢？





直到1930年，物理学家还不知道原子核中有中子存在。原子核的正电荷数与它的质量不相符的事实告诉人们，在原子核中除了含有带正电荷的质子外，还应该含有其他粒子。1931年，约里奥－居里夫妇(Frédéric Joliot-Curie 和 Irène Joliot-Curie)公布了他们关于石蜡在“铍射线”照射下产生大量质子的新发现。查德威克(James Chadwick)意识到，这种“铍射线”很可能是由中性粒子组成的，他立刻着手利用云室测定这种粒子的质量，结果发现它的质量和质子一样，但不带电荷。他称这种粒子为“中子”。中子的发现解决了理论物理学家在原子研究中遇到的难题，是原子物理学研究上的一项突破性进展。查德威克因此被授予1935年的诺贝尔物理学奖。

发现中子的意义远远超出原子物理学的范围。很快，天体物理学就面临这样一个问题：宇宙中有没有“完全由中子组成的恒星”？在物理学实验室中一个微观世界实验的进展，马上向宏观世界中的恒星提出了挑战。

1932年，发现中子的消息传到正在哥本哈根访问的苏联物理学家朗道(Лев Давыдович Ландау)那里，仅过了几个小时，他就提出了中子星的概念。他认为中子星非常小，非常致密，辐射非常微弱。比较完整的中子星理论是由兹维基(Fritz Zwicky)和巴德(Wilhelm Heinrich Walter Baade)在1934年各自提出的。他们认为：“中子星是大质量恒星演化到超新星爆发之后的产物。恒星坍缩后，在其核心形成中子



休伊什

星。"1939 年，关于中子星的内部结构理论也提出来了，并得出中子星的质量约为一个太阳质量，半径为 10 千米，密度达到 10^{14} 克/厘米^3。

很自然地，当人们第一次听到这种体积小得惊人、密度却大得出奇的恒星时不禁会问，太空中真有这样的天体吗？中子星太不寻常了，连不少天文学家也都提出了疑问。况且，即使所有的天文学家都对中子星的存在深信不疑，又怎样去寻找中子星呢？

天文学上的发现都是通过观测天体的辐射得到的。要想发现中子星，必须知道中子星的辐射特征。那时，天文学家处于"一问三不知"的窘境：一是不知道中子星的辐射主要在射电波段；二是不知道中子星的辐射是脉冲形式；三是不知道中子星自转得如此之快。这不是天文学家的过错，天文学研究的魅力所在，就是它常常出人意料。

1862 年，天文学家通过观测研究天狼星的伴星发现了白矮星。这颗伴星比天狼星暗 10 个星等，光度相差 1 万倍。由于光度和恒星的表面积成正比，因此可以判定该伴星的表面积只有天狼星的万分之一，半径约为 7000 千米，和地球差不多，密度则高达





$10^5 \sim 10^7$ 克/厘米^3。这是人类发现的第一颗白矮星。观测实践走在理论的前面，在白矮星发现之后很久，物理学家才弄清了形成白矮星的基本物理原理。

中子星半径只有10千米，表面积很小，用证认白矮星时的方法计算，它的光度只有普通恒星的几十亿分之一，即使用现代大型光学望远镜也难以观测到，因此很少有人去尝试。不过，在发现中子星以前，天文学家也曾在光学、射电和X射线的观测中无意地记录到来自中子星的辐射，只是"不识庐山真面貌"罢了。

天体物理学本身的发展也逐渐把中子星问题提到日程上来。1949年，射电天文学家确认蟹状星云是一个射电源。光学观测发现蟹状星云在膨胀，膨胀速率约为0.2角秒/年，而且膨胀速度在加快。后来又发现了它的X射线和γ射线辐射。把蟹状星云所有频率上的辐射加起来，大约相当于太阳辐射的10万倍。其辐射特征表明，那是高能电子在磁场中绕磁力线作螺旋运动时所发出的同步辐射。蟹状星云是一团稀薄的气体，超新星爆发时所产生的高能电子的能量早已大大减弱，如此强的同步辐射，其能量来自何方？源源不断的高能电子来自何处？其磁场是怎样形成的？星云加速膨胀的能量由谁来提供？这一系列问题成为天文学家观测和理论研究的热点。帕齐尼(Franco Pacini)预言，提供所需能源的是蟹状星云中的一颗中子星。当时的天文学家曾在

蟹状星云中多次搜寻，但都没有找到中子星。

1965 年，休伊什也在研究蟹状星云，他用行星际闪烁方法测出了蟹状星云中存在一个致密成分，其角直径仅约 0.2 角秒，亮温度达到 10^{14}K。当时他就指出这个致密成分可能是 1054 年超新星爆发的遗留物。可惜，他没有认识到这个致密源就是一颗中子星。

休伊什和行星际闪烁

1924 年 5 月 11 日，休伊什出生在英格兰南部康沃尔郡的一个银行家家庭里。少年时代他就爱好科学，常在家里做自己感兴趣的电学和化学试验。11 岁时在汤顿的国王学院上中学，中学毕业后进了剑桥大学。一年之后，1943 年 5 月他成为英国皇家飞机研究所的成员，不久调到电讯研究所。战争期间，他参与机载反雷达设备的研究，指导空军人员使用雷达干扰设备。第二次世界大战结束后，休伊什于 1946 年回到剑桥大学继续学习，1948 年毕业后被推荐进入卡文迪什实验室工作。1952 年获博士学位后，休伊什留在卡文迪什实验室成为赖尔的助手。休伊什参与了赖尔小组的大型射电干涉仪和综合孔径射电望远镜的研制以及射电巡天和射电宇宙学、射电源物理学等方面的研究，取得了开创性的成果。

休伊什之所以能和诺贝尔物理学奖结缘，得益于他的行星际闪烁研究。在晴朗的夜晚，我们仰望





星空，就会看到星星在向我们"眨眼"，那是由于地球大气对流层中空气密度的不规则变化对光波的扰动。地球的电离层则会造成来自天体的无线电波的闪烁。太阳系行星际空间充满着太阳风带来的密度不均匀的等离子体，它们也会使射电波发生闪烁。行星际介质造成的射电波闪烁现象是快速的，在秒的数量级。只有角径很小的射电源发出的射电波通过行星际空间才会产生闪烁现象，因此通过观测射电源的行星际闪烁，可以判别它们是不是小角径的类星射电体。此外，通过研究行星际闪烁还可以了解日地空间、太阳风及太阳外层大气的情况。

早在1948年，休伊什就参加了赖尔领导的剑桥小组，开始研究射电源强度起伏的现象。他侧重研究射电源产生闪烁的原因，弄清了射电源强度的不规则起伏是电离层引起的电波闪烁。1954年，休伊什根据衍射理论导出一个重要的结论：角径足够小的射电源的辐射，通过太阳的外层大气——日冕时，可能产生明显的闪烁。8年以后，他进而提出，如果日冕的不均匀性延伸到整个行星际空间的话，那么这种现象就成为行星际闪烁。为了深入分析这种闪烁现象，休伊什研究了无线电波在不均匀透明介质中的传播理论，提出了"相位屏衍射"理论。

1960年，美国天文学家桑德奇(Allan Rex Sandage)发现，有一个名叫3C48的射电源性质很奇特。它貌似一颗普通的恒星，但光谱却与寻常的恒星大不相同。其光谱中有一些又宽又亮的发射线，

处于令人难以理解的位置上，所以长达三年之久竟无人能够识别。1963 年，另一位美国天文学家马丁·施米特(Maarten Schmidt)又发现，3C273 这个天体的光谱也与 3C48 相似，并认识到其光谱中的 4 条亮线其实就是普普通通的氢线。这些谱线原本应该位于光谱的紫外区，但是它们具有非常大的红移，所以才出现在可见区。而且，只要承认存在这样的红移，那么光谱中其他所有的谱线也就都可以证认了。后来又陆续发现许多和 3C48、3C273 相似的天体，它们都具有像恒星那样小的角径(小于 1 角秒)，但它们又不是恒星，故称为“类星体”。类星体有很大的红移，这表明它们正在以巨大的速度远离我们。类星体是天文学家迄今所知距离最遥远、能量最大的天体，在宇宙学和天体物理学上有着极其重要的意义。这一发现立刻引起射电天文学家的极大兴趣，形成搜寻类星体的观测热潮。

1964 年，休伊什等在 178 兆赫频率上对一些类星体和星系进行行星际闪烁的观测，结果表明只有类星体才有射电强度起伏，从而得知只有角径小于 1 角秒的射电源在观测波长大于 1 米的情况下才会出现行星际闪烁。因此，行星际闪烁技术能在米波段提供大约 1 角秒的高分辨率，成为确认类星体射电源的非常有效的方法。

1965 年，剑桥大学射电天文台决定采用行星际闪烁技术大规模地确认类星体，为此成立了由休伊什领导的课题组，研制专门用于观测行星际闪烁的





大型射电望远镜。由于类星体是河外射电源，离我们特别遥远，射电流量密度特别微弱，必须要有足够大的天线面积。据此设计的长470米、宽45米的矩形天线阵，由16排、每排128个振子（共2048个振子）组成。一排排振子挂在1000多根约3米高的木杆上。振子和馈线用较粗的铜线制作，总共用了近200千米长的铜线、电缆和涤纶链线，和24 000个塑料绝缘子。天线接收面积达21 000余平方米，灵敏度很高。

行星际闪烁随波长的增加而增强，选择3.7米的工作波长，不仅是因为在这个波段行星际闪烁显著，而且还因为在这个波段可以比较容易地研制出接收面积很大的天线。行星际闪烁是短时标的变化，要求望远镜接收系统的时间分辨率达到0.1秒。望远镜固定不动，由于地球自转，射电源每天经过望远镜的天线方向主瓣一次，前后约几分钟。为了确定行星际闪烁相对于与太阳的角距离的变化关系，要求对每个射电源重复地进行测量。

和当时英国焦德雷尔班克的76米直径射电望远镜相比，这是一台造价很低、构造比较简陋、功能单一的射电望远镜。然而，谁也没有想到，研制观测行星际闪烁的设备却为发现中子星铺平了道路。休伊什好像是“专门”为发现脉冲星面设计了这台用于研究闪烁的射电望远镜。望远镜接收面积特别大，解决了脉冲星辐射特别微弱的问题；工作波段选在3.7米，而脉冲星辐射恰好是幂律谱，在米波比较

强;望远镜接收机的时间分辨率选在0.1秒,恰好比大多数脉冲星的周期短;行星际闪烁的观测要求重复测量,则是发现这种很像“干扰”的脉冲星信号所必不可少的。对发现脉冲星而言,真可谓“万事俱备”了。

乔斯林·贝尔和脉冲星的发现

乔斯林·贝尔小姐是休伊什的博士生,他们一起发现了震惊世界的脉冲星。那时,她年仅24岁。贝尔在英国格拉斯哥大学获物理学学士以后就想攻读天文学博士学位。她首选的是焦德雷尔班克天文台,可是由于工作人员把她的申请丢失,她才到了剑桥大学。一位管理研究生工作的负责人在回答焦德雷尔班克天文台台长的批评时说,“要不是我把她的申请信丢了,那脉冲星到现在还没有发现呢!”乔斯林·贝尔的确十分优秀,但她如果不是到休伊什那里做研究生,就没有机会参加当时最高水平的行星际闪烁观测研究,她即使再聪明,恐怕也是无缘发现脉冲星的。

贝尔女士到剑桥大学攻读博士时,休伊什正忙于建造那架供研究闪烁用的射电望远镜。头两年她全心全意地投入到望远镜的建设。这台射电望远镜规模大,但比较简单,完全由他们自己动手建造。连贝尔女士一共有6个人,有时还有学生来帮忙。

1967年7月,这套装置投入运行。在休伊什的





指导下，贝尔负责观测和分析记录，每周重复巡视一次，每天记录纸有七八米长。6个月的观测取得记录纸长达5.6千米的原始资料。望远镜非常灵敏，很容易接收到附近的无线电干扰。区分闪烁源和干扰成为每天必做的工作。在观测程序上，每隔一周重复观测一次，这样才能把干扰识别出来，虽然干扰信号和天体信号很相像，但是它们出现的规律不同，多次重复观测就能区分开来。

8月，贝尔注意到一个发生在深夜的“闪烁源”（图5）。这是很不寻常的，因为夜晚太阳风很弱，强闪烁源是不会出现在夜晚的。这个奇怪的“闪烁源”所在的天区内没有要观测的射电源。贝尔提醒休伊什注意，建议进一步研究。

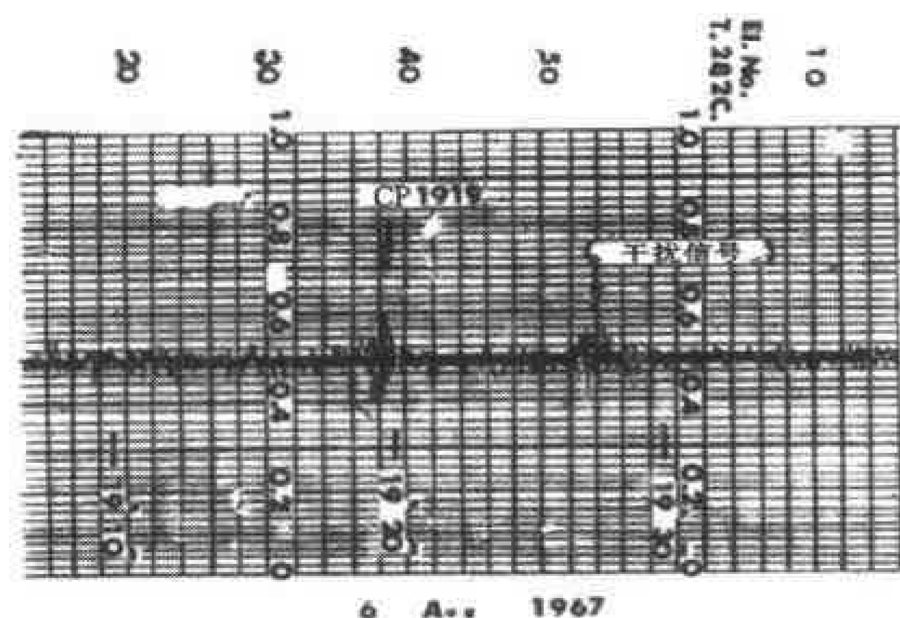


图5　休伊什和贝尔1967年8月6日发现第一颗脉冲星CP1919的记录。在脉冲星信号附近有一个与之相仿的干扰信号，但贝尔还是把脉冲信号区分出来了

在排除了人为干扰和确认这个信号沿天穹的移动遵守恒星时以后,休伊什认为它可能是来自太阳系之外的一颗射电耀星,于是决定用快速记录仪确定信号的性质,看它是否与太阳耀斑的射电辐射有相似的性质。由于这个源时隐时现,一直到11月28日,贝尔才成功地记录到这个起伏信号,发现是一系列强度不等但时间间隔基本相等的脉冲,脉冲的间隔约为1.33秒。休伊什得知后的第一感觉是认为这些规则脉冲一定是人为的,任何已知天体的辐射都不是这样的短周期脉冲。这种信号很像我们通信用的电报,因此他提出可能是在太阳系外围绕其他恒星公转的行星上的"小绿人"发出的信号。如果这一想法正确,那么这种脉冲信号中必然附加了行星轨道运动产生的多普勒位移。但是,他们经过一系列的观测,并没有测出这种位移,从而否定了有关小绿人的看法。贝尔当时并不理解休伊什的判断。10年后她曾写道:"当时我不完全理解休伊什的看法,为什么一系列的脉冲一定是人为的。我所不知道(但本来应该知道)的是,这样快速的变化是难以从恒星、星系或当时所知的任何其他类型的天体获得的。"然而,贝尔"不理解的"却是正确的,脉冲信号就是来自恒星的辐射。

休伊什利用精确的时标,在改正地球轨道运动的影响之后,惊讶地发现他们测量到的脉冲周期可以精确到千万分之一秒:测出的周期是1.3372795秒。他们终于确认脉冲信号来自一种新型的天





体——脉冲星。当时取名为 CP1919,CP 表示剑桥大学的脉冲星编号,1919 是脉冲星的赤经。紧接着,贝尔又从早先的 5000 多米观测记录纸记录的资料中找到 3 颗脉冲星。其中一颗名叫 PSR0950 + 08 的,脉冲周期仅 0.25 秒。

作为脉冲星的最先发现者,贝尔的功绩是不可磨灭的。虽然她的主要任务是在导师指导下进行行星际闪烁观测,但她对观测中出现的"新现象"穷追不舍,抓住极易与"干扰"混淆的短促脉冲信号不放,导致脉冲星的发现。

乔斯林·贝尔博士在谈到脉冲星的发现时说,"我在这儿搞一项新的技术来拿博士学位,可一帮傻乎乎的小绿人却选择了我的天线和频率来同我们通信。"这说明了她发现脉冲星的好运气。然而,偶然发现并不是仅凭运气。如果没有她的细心和坚韧,物理学家所预言的中子星又不知要推迟多少年才能被发现! 发现脉冲星的第二年,贝尔获得博士学位。博士论文的主题仍是类星体闪烁,仅在附录中提到脉冲星的发现。

脉冲星的真面目

1968 年 2 月,人们在英国《自然》杂志刊登的休伊什等的论文中看到了脉冲星这个新名词。该论文指出,脉冲星是一种极为奇特的天体射电源,它在太阳系之外,发射短暂而极有规律的无线电脉冲;它是

某种密度非常大的星体，很可能就是中子星。

不过，休伊什用中子星径向振荡理论来解释辐射的脉冲性质却是不正确的。如果是中子星径向振荡，其脉动周期远远达不到脉冲星周期的稳定度。特别是，脉冲星的周期范围很宽，超过3个数量级；根据恒星径向振荡理论，与此相应的脉冲星密度范围要超过6个数量级，也就是这类恒星的密度要相差100万倍以上。然而，同一类恒星的密度不可能有如此大的差别。

早在1967年，帕齐尼在脉冲星发现前夕发表的一篇论文中就已提出关于脉冲星的正确看法，"在蟹状星云中存在一个由中子组成的恒星，它每秒自转多次，有很强的磁场，它的磁偶极辐射不断地给蟹状星云提供能量。"这个结论与脉冲星发现后30多年来的理论研究结果非常一致。可以说帕齐尼已经给出"脉冲星是什么"这一难题的正确回答，也解决了蟹状星云能源之谜。脉冲星发现以后，几乎所有的大型射电望远镜都转向观测第一批发现的脉冲星。两年后，在蟹状星云和船帆座星云中发现的两颗脉冲星更具有特殊的意义，因为它们都处在超新星遗迹之中，超新星爆发产生中子星的预言也得到了证实。

托马斯·戈尔德（Thomas Gold）的理论研究进一步确认了脉冲星就是自转磁中子星。戈尔德在研究这个问题时并不知道帕齐尼的论文，很凑巧，当他撰写这篇论文时，帕齐尼正在他们大学访问，而且就在





他隔壁的办公室工作。戈尔德和帕齐尼的模型都认为，中子星具有非常强的磁场，在磁极冠区，带电粒子在磁场中运动发出曲率辐射，形成一个方向性很强的辐射锥，就像灯塔发出的两束光一样。辐射锥的中心是磁轴。一般地说，磁轴和中子星自转轴不重合，所以当辐射锥随中子星一起转动而扫过地球上的射电望远镜时，我们就接收到一个脉冲(图6)。他们的理论模型被天文学家广泛地接受，成为证认中子星存在的最关键的一步。从此，天文学家对脉冲星就是自转磁中子星的结论深信不疑。30多年前理论预言的中子星终于被找到了。

高速自转的中子星，具有和太阳相当的质量，

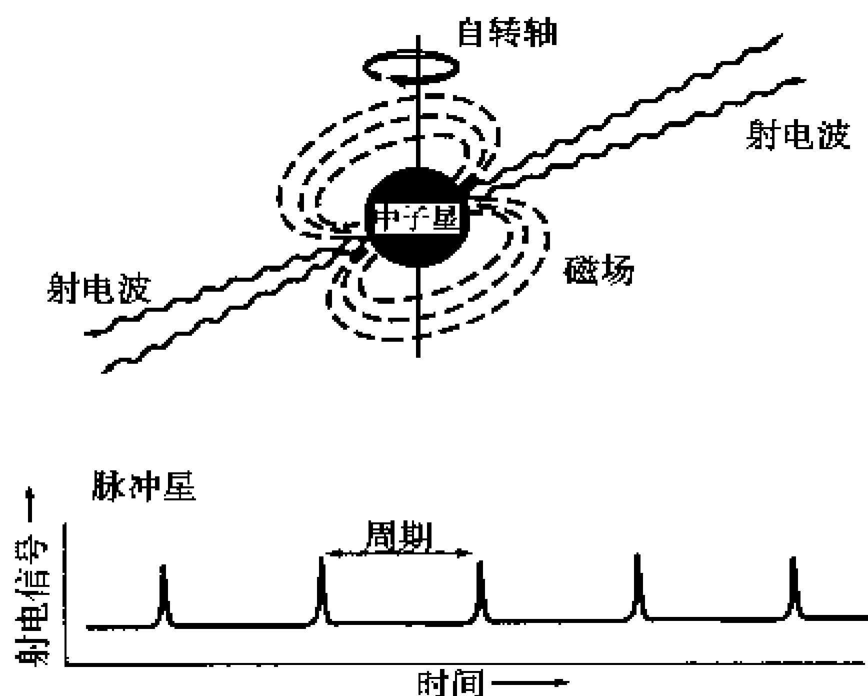


图6　中子星具有非常强的磁场，在磁极冠区，带电粒子在磁场中运动发出曲率辐射，形成方向性很强的辐射束。当辐射束和中子星一起转动扫过地球时，射电望远镜就接收到一个脉冲信号

但半径只有10千米，具有大得惊人的密度，每立方厘米约达1亿吨，温度高达几亿开。自转最快的1秒钟达几百周，这种极快的自转周期正好是它的射电脉冲周期。中子星具有超高压、超高温、超强磁场和超强辐射的物理特性，使之成为地球上不可能有的极端物理条件下的太空实验室。更为奇特的是，在高温高密条件下，中子星却存在着人们已知的地球上实验室中极低温度下的超流、超导现象。

高速自转的脉冲星有一个与它一起共转的磁层。脉冲星磁层是一个包含了极端相对论性带电粒子、超强等离子体波和极强磁场的奇异混合物。这些条件是其他天体所不具备的。辐射过程发生在磁极冠的开放磁力线所包围的区域中。少数脉冲星还有光学、X射线、γ射线脉冲。脉冲星的发现，不仅为天文学开辟了一个新的领域，而且对现代物理学产生了重大影响，并导致了致密态物理学的诞生。

为贝尔博士说句公道话

休伊什由于和贝尔一起发现了脉冲星，把它证认为30多年前物理学家预言的中子星，震惊了科学界，并获得了1974年的诺贝尔物理学奖。休伊什教授获奖是当之无愧的。但是，乔斯林·贝尔博士对发现脉冲星的重要贡献也是不容抹杀的。国际天文学





界许多人士都认为，诺贝尔物理学奖只授予休伊什一人，对于贝尔的贡献是有失公正的。

贝尔博士并没有因为与诺贝尔奖无缘而发怨言。相反地，她却站起来为她的老师休伊什教授讲公道话。贝尔博士还曾谦虚地写道，"10年前，当我们漫不经心地偶然发现脉冲星时，我们要找的是遥远的类星射电源，但却发现了离我们很近的脉冲星。"

天文学家们并未因为贝尔博士的谦虚而忘怀她的卓越贡献。实际上，早在脉冲星发现以前10多年，国际上有好几台大型射电望远镜就已具备发现脉冲星的能力，而且还多次记录到来自脉冲星的信号。但是，有关的天文学家并未察觉，以致失之交臂。很清楚，倘若没有贝尔精细过人的工作和坚韧不拔的精神，同样也会失去发现脉冲星的机会。

1977年，著名脉冲星专家曼彻斯特（R. N. Manchester）和泰勒在他们的专著《脉冲星》的首页写道："献给乔斯林·贝尔博士，没有她富于洞察力的、百折不挠的努力，我们可能就无法分享到研究脉冲星的这份快乐。"

1980年，在德国波恩召开国际天文学联合会第95次学术会议，题为"脉冲星—中子星研究13年"。这次会议聚集了世界各国的脉冲星专家，其论文集首页上刊登了贝尔和休伊什的会间合影（图7），并冠以文字说明"脉冲星发现者的再次会见——乔斯林·贝尔博士和休伊什教授"。这代表了当代脉冲星



图 7　国际天文学联合会第 95 次学术会议论文集首页发表的贝尔和休伊什在会议期间的合影

学者的心声，他们愿把脉冲星发现者的桂冠戴在贝尔博士的头上，以弥补那不能更改的遗憾。



4

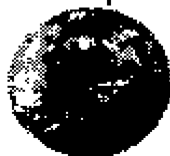
脉冲双星和引力辐射

令人神往的引力波

继1974年休伊什因发现脉冲星而获得诺贝尔物理学奖之后，1993年，赫尔斯和泰勒又因发现射电脉冲双星共同获得该年度诺贝尔物理学奖，引起了全世界的轰动。

他们发现的脉冲双星系统之所以重要，不仅因为是第一个，而且还因为它是轨道椭率很大的双中子星系统，更重要的则是它成为验证广义相对论预言的引力辐射存在的空间实验室。他们经过近20年坚持不懈的努力，上千次的观测，终于以无可争辩的事实，证实了引力辐射的存在，开辟了引力波天文学的新领域。

什么是引力波？这还得从20世纪最伟大的科学家爱因斯坦(Albert Einstein)建立的广义相对论说起。该理论被称为20世纪理论物理学研究的巅峰，同量子理论一起成为今天原子能、航天、天体物理等





现代科学的主要理论基础。

按照广义相对论，只在引力场很弱时，牛顿引力定律才适用。爱因斯坦曾基于广义相对论作出三项预言：光线在太阳引力场中的弯曲、水星近日点的进动规律和光谱线在引力场中的红移现象。这三个预言都先后得到了证实。但是，自从广义相对论预言宇宙空间中可能存在引力波以来，人们虽然在地球上建造了许多探测宇宙引力波的实验装置，却均未捕捉到有关引力波的可靠信号。引力波的作用实在是太微弱了，目前的实验条件还达不到所需的灵敏度。

引力波的探测是一项物理学家们为之牵肠挂肚的重大课题。探测引力波的突破点在哪里？建造高灵敏度的引力波天线是物理学家们努力奋斗的方向之一。引力波的作用是使物体发生扭曲和变形，因此引力波天线常常是一根棒，借助测量这个天线极微小的扭曲和变形，应能确定是否接收到了引力波。如今，测量微小变化的相对灵敏度已经达到 $10^{-18} \sim 10^{-20}$。在地面上，无论探测仪器放置在哪里，总难避免干扰。若将引力波探测器放到太空中去，则有可能进一步提高灵敏度，例如达到 10^{-22}。然而，有了灵敏度非常高的引力波探测器，是不是当真就能探测到引力波呢？

辐射引力波的源都是天体系统，因此探测引力波也是天体物理学的重大研究课题。宇宙中可能存在三种类型的引力波。第一类是由超新星爆发、致



泰勒

密天体造成的突发事件引发的引力波，其特点是强度大、频带宽，但时间短暂。如超新星 SN1987A 就有强大的引力波发生，但它距离较远，地球上的仪器检测不出来。如果在银河系中发生这样的超新星爆发，地球上的探测器就有可能检测出它辐射的引力波。第二类是各种双星、具有较大椭率的转动星发射的引力波，其频率稳定，但强度小。第三类是无规背景辐射的引力波，是由各种无规运动的辐射遗留下来的，包括宇宙极早期各种过程的辐射，各种双星辐射的叠加等。

新理论需要时间来验证它的正确性。然而，这个时间等得太长了！等了半个多世纪。直到 1974 年，泰勒和赫尔斯发现射电脉冲双星才为探测引力波带来重大转机。

站在脉冲星研究最前沿

1967 年当休伊什和贝尔发现脉冲星的时候，泰勒还是一位博士研究生。泰勒 1941 年 3 月 29 日生于费城，1963 年大学毕业后到哈佛大学攻读博士学位。1968 年初，当《自然》杂志刊出发现脉冲星的惊





人消息时，他刚写完博士论文，这时他已决心把“研究脉冲星”当作终身奋斗的目标。1968年获得博士学位后，泰勒就和哈佛大学的同事提出一项利用美国国家射电天文台的92米射电望远镜观测研究脉冲星的计划。继休伊什等发现的首批四颗脉冲星后，他们发现了第五颗脉冲星。1969年他又和麻省理工学院的同事一起，研制了一台大型的、造价比较低廉的射电望远镜，特别适宜于观测脉冲星。

科学研究总是不断前进的，科学家就是要做前人未做或前人不能做的课题。泰勒有一句名言：“有可能产生重大意义的研究，再困难也得试一试。”就这样，他一直站在脉冲星研究的最前沿，发展了一种能增加接收系统频带宽度的消色散新技术，提高了射电望远镜的灵敏度，并致力于把计算机技术引入脉冲星巡天观测中。他在向美国国家科学基金会申请购置计算机的报告中明确写道：“即使我们只发现一个脉冲星双星系统，也将是十分有意义的，因为至少可以由此估计出脉冲星的质量。”

但是，究竟怎样去发现脉冲双星，人们都没有经验。1973年，泰勒着手准备一个新的巡天观测，其主要目标是发现短周期、远距离的脉冲星，并没有对发现脉冲星双星系统进行具体的策划。和休伊什发现脉冲星时的情况有一些类似，休伊什的行星际闪烁观测技术并不是为了发现脉冲星，却正适合发现脉冲星的需要，因而偶然地发现了脉冲星。泰勒的巡天计划所采用的技术是为了发现短周期、远距离

的脉冲星，而脉冲双星正具有这样的特点。发现脉冲双星也由此而成为必然。首次发现的脉冲双星PSR1913+16的周期很短(仅59毫秒)，距离很远。目前发现的大多数射电脉冲双星的周期都很短，这些脉冲双星中有2/3是毫秒脉冲星。

脉冲星观测，首要问题是望远镜的灵敏度是否足够高。脉冲星的辐射一般很弱，目前观测到的最弱的一颗脉冲星，其流量密度只有0.1毫央，也就是说在地球上只能接收到每平方米每赫兹10^{-30}瓦的功率。早期发现的脉冲星均属强源，进一步要发现的目标则比较弱，这就对望远镜的灵敏度有了更高的要求。射电望远镜的灵敏度由天线面积、接收机的噪声温度、频带宽度和时间常数决定。为了取得较高的灵敏度，要求天线面积尽量大，接收机的频宽足够宽，积分时间足够长且噪声温度足够低。通常的观测总是愿意把接收机的积分时间常数调得长一些，使频带尽量宽一些。但这却给脉冲星的观测发现带来了致命的问题。

积分时间常数也就是采集能量的采样时间，当采样时间和脉冲星的周期相当时，将会把脉冲信号平滑掉，因此采样时间必须比脉冲周期短很多。泰勒要发现短周期脉冲星，观测的采样时间就只能取10毫秒，也就是说1秒中要采100个数据。现在，由于发现了毫秒脉冲星，脉冲星观测所用的采样时间已是0.1毫秒甚至0.05毫秒。由于采样时间很短，射电望远镜的灵敏度受到很大限制。为了取得尽量





高的灵敏度，他们选用美国阿雷西博天文台的世界上最大的射电望远镜，其口径为305米。选用的频率比较低(430兆赫)，因为脉冲星辐射是幂律谱，高频的辐射比低频的要弱很多。

频带宽度的限制是由于星际介质对脉冲星辐射的影响造成的。脉冲星辐射在传播过程中受到星际介质中自由电子的影响，不仅传播速度发生变化，而且还使传播速度随频率而变化，一个脉冲的高频成分比低频成分要提前到达地球。这样一来，来自脉冲星的窄脉冲就可能被展宽了，甚至被平滑掉。对于远距离的脉冲星，这种效应就更严重。为了克服这一困难，泰勒采用消色散技术，研制了具有32个频率通道的接收机。每个通道仅有250千赫兹的带宽，保证了脉冲不被展宽。这32个通道的中心频率依次降低，每个通道的频带一个挨着一个，总共覆盖8兆赫的频带宽度。由于各个通道的频率不同导致的时间延迟，在资料处理时加以修正。32通道接收系统既解决了脉冲被展宽的难题，又保证了较高的灵敏度。但是消色散接收系统也带来很大的困难，观测数据量增加了32倍，使资料处理量剧增。那时，电子计算机还不发达，应用更不普遍。但他们还是应用最先进的电子计算机技术成功地解决了这个难题。

当时灵敏度最高的脉冲星巡天计划终于可以付诸实施了。期望这次巡天有所发现决不过分，但是泰勒做梦也没有想到，这次巡天发现了导致他荣获诺贝尔物理学奖的脉冲双星。

赫尔斯的精心求证

1973年还在马萨诸塞大学当研究生的赫尔斯是泰勒教授的研究生。他1950年11月28日生于纽约，1970年大学毕业。他以极大的兴趣和热情，把泰勒提出的脉冲星巡天计划当作博士论文。赫尔斯回忆说，当时他毫不犹豫地接受了这个极富挑战性的博士论文题目，因为这个课题体现了射电天文学、物理学和电子计算机科学三个学科完美的结合。

巡天观测是要发现新脉冲星，它们的位置、周期、色散量、脉冲宽度均是未知数。自不待言，这需要在所巡查的天区一小块一小块地细心观测，在430兆赫频率上，阿雷西博射电望远镜的方向性很强，主瓣是一个很窄的铅笔束，一次观测只能覆盖0.06平方度的天区。计划中要对140平方度进行巡查，这样就要观测2000多次。消色散技术要求知道色散量，而脉冲星的色散量又是未知数，只能在处理资料时一点一点地试探，各个脉冲星的色散量差别很大，要试探非常多的次数。采用按周期折叠的方法，把长时间的观测数据累积起来以提高灵敏度，这要求知道周期。而在脉冲星尚未发现时，周期当然也是未知数。这又要一点一点地去试探。脉冲星的周期从1.6毫秒到5秒，相差3个多数量级，要试探的次数比色散量还要多。数据量和计算量之大十分惊人。通常在巡天时，对每一天区要观测5分钟，32





频率通道的输出,10毫秒采一个数据,整个140平方度的观测将有10亿个数据。如果观测到脉冲星,在处理资料时只有当试探的周期值和色散量都非常接近真值时,才能获得最高的灵敏度。这需要把每一处观测数据进行50万次组合。总的巡天资料处理要进行的组合高达10亿次。电子计算机成为泰勒和赫尔斯获得成功的关键,也推动了脉冲星观测研究的发展。

赫尔斯以惊人的毅力和工作热情顺利完成了140平方度天区的观测和资料处理。这个天区以前也有人巡查过,曾发现了10颗脉冲星,而他们这次巡天却又发现40颗新脉冲星。这次巡天的成功率比以前的高出4倍,可以说取得了空前的成果。在当时仅已知100颗脉冲星的情况下,一下子增加了40颗,对脉冲星的研究自然有巨大的促进。特别是因为其中包括了人类发现的第一个脉冲双星系统,更使这项巡天观测成果身价百倍。

在巡天观测中发现脉冲星的关键判据是,该射电源的辐射具有准确的周期性。这需要经过多次观测和精确测量。观测表明脉冲星的周期十分稳定,它们的周期变化率在10^{-12}秒/秒至10^{-20}秒/秒之间,因此在几天之内是很难察觉到它们的周期变化的。

在新发现的40颗脉冲星中,有一颗脉冲星PSR1913+16周期仅0.059秒,色散量高达169秒差距/厘米^3。1974年8月25日,赫尔斯分析PSR1913+


赫尔斯

16前几天的观测资料以确定它的准确周期，却得到一个出乎意料的、令人迷惑的结果。他在8月25日的观测记录里详细记载了两次观测资料的处理结果，并惊奇地指出，这颗星的周期只有59毫秒，但时隔两天的两次观测，周期值的差别竟达27微秒之多。短时间内周期变化如此之大的现象，在此之前的脉冲星观测中还没有过。赫尔斯当时感到极度的烦恼和困惑。他在不停地思考着："究竟什么地方出了错？"两天后，再观测一遍，得到的结果"更坏"。这时他决心要把其中的原因弄个水落石出，无论如何要把这颗脉冲星的准确周期测出来。

赫尔斯当时猜想，可能是观测系统的某一环节出了问题，也可能是资料分析方法不当。各种可能的原因必须一一查明。当时认为第一个原因可能出在接收机采样时间上，10毫秒的采样时间对这颗短周期脉冲星可能是太长了。为此，改用1毫秒采样时间，在9月1日和2日重新进行观测。原来以为一切将会烟消云散，而得到的观测结果却是疑云更重。

然而，赫尔斯在重新观测的资料中查出了一些征兆。脉冲周期的变化存在着某种规律性。他把两





天观测的周期变化曲线放在一起,发现如果移动45分钟的话,则两条曲线可以很好地相衔接。

赫尔斯终于悟出了其中的奥妙:脉冲周期规则地变化可能是源于双星的轨道运动。他没有立刻向他的导师报告这一重要的进展,而是要作更多、更严格的求证。当时他提出一个严格的判据,即如果PSR1913+16是一个脉冲双星系统的话,所测得的周期中就应包含双星的轨道运动因素,在脉冲星绕伴星运动且离地球越来越远的那段时间里,观测到的周期应该越来越长;而在脉冲星绕伴星运动且离地球越来越近的那段时间里,观测到的周期应是越来越短。如果周期变化是由双星运动影响所致,那么这种周期变化必然会存在由下降趋于极小然后转而呈增加趋势的时刻。为此他又整整观测了两个星期,终于在9月18日证实了这种周期变化规律。第一个脉冲双星系统被证实了。赫尔斯当即写信和打电报给他的导师泰勒教授,报告发现了一个轨道周期约为8小时的脉冲双星系统的惊人消息。

赫尔斯从1974年8月25日到9月18日的近一个月中可谓绞尽脑汁,反复地观测、分析、求证,终于确认了PSR1913+16是一个双星系统(图8)。然而这仅是定性的确认,定量地分析这个脉冲双星的轨道参数,特别是验证广义相对论所预言的引力辐射,则仍有更长的路要走。

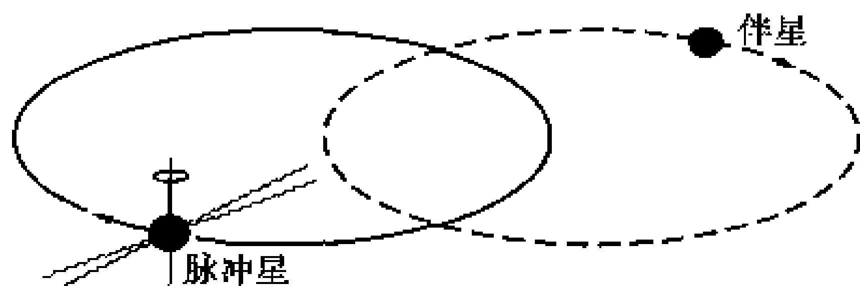
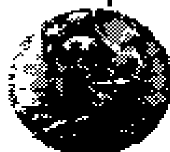


图 8　脉冲双星轨道运动示意图。首次发现的射电脉冲双星 PSR1913 + 16 的两个成员星都是中子星，它们绕该系统的质量中心作椭圆轨道运动

理想的引力实验室

在银河系中，双星系统很平常，已知的恒星有近一半属于双星系统。对中子星来说，所有伴有 X 射线辐射的中子星也都是双星系统的成员。但是在射电脉冲星的世界里双星却很少见。在休伊什和贝尔于 1967 年发现脉冲星至 1974 年获得诺贝尔物理学奖的 7 年中，共发现了近 100 颗脉冲星，但它们都是单星。这一观测事实并不是一种观测效应。理论研究指出，如果双星系统中质量较大的恒星爆发，很可能使双星系统瓦解。密近双星系统中质量较大的恒星演化快，但是只有当其质量大于 16 个太阳质量时，才有可能经过爆发而形成中子星。另一方面，单星爆发形成中子星却只要求该星的质量在 4 到 10 个太阳质量之间。因此，单星爆发要比双星系统中的恒星爆发多得多，约为 100∶1。所以，银河系中的射电脉冲双星的数目很少。基于这一判断，早期的





脉冲星巡天研究都没有把发现脉冲双星当作追求的目标。

从1967年到1982年，近15年中发现的脉冲星双星少得屈指可数，只有3颗。1982年发现毫秒脉冲星后，相应的双星数量急剧增加，仅一次观测就在杜鹃座球状星团中发现11颗毫秒脉冲星，其中有6个是双星。到目前已发现约50个射电脉冲星双星系统，其中大多数双星是一个中子星和一个白矮星组成的系统。1980年发现的PSR0820+02的轨道周期特别长，为1232天，差不多要4年才转一圈；椭率等于0.012，接近圆轨道；该双星系统中的那颗中子星的自转周期比较长，是865毫秒，伴星的质量为0.2～0.4太阳质量，为白矮星。1982年发现的PSR0655+64轨道几乎为正圆形，轨道周期和地球差不多，为1.03天，中子星的自转周期为196毫秒，伴星的质量为0.4～0.9太阳质量。少数脉冲双星是双中子星系统，还发现两个脉冲星的伴星是主序星。

目前已观测到5例双中子星系统。赫尔斯和泰勒获得1993年度诺贝尔物理学奖，不仅是他们发现了第一例脉冲星双星系统，更重要的是因为该系统是轨道椭率很大的双中子星系统，从而成为验证引力辐射的最好的样本。1991年，又发现一个椭率比较大的双中子星系统PSR1534+12。其轨道周期为10.1小时，轨道椭率为0.27，和PSR1913+16相比还有独特的优点：脉冲信号强，脉冲宽度窄。这可以保

证脉冲到达时间的测量精度更高。这又是一个可供检验广义相对论引力辐射预言的观测对象。

20 载心血验证引力波

X 射线双星由一颗中子星和一颗光学伴星组成。中子星吸积光学伴星抛出的物质，并在中子星表面附近转化为 X 射线辐射。这类双星的中子星自转会因吸积物质而加快。射电脉冲双星一般由两颗中子星或一颗中子星与一颗白矮星组成。对于轨道周期很短的、轨道椭率较大的双中子星系统，两颗中子星靠得很近，脉冲星的轨道运动速度是变化的，且可以接近光速。根据广义相对论推断，任何具有质量的物体作加速运动时都应该产生引力波。进一步还可以计算出，这类双中子星系统有很强的引力辐射，而引力辐射又会导致双星系统轨道运动周期变短。如果我们能够测量出脉冲双星轨道周期的变化，便能间接地确认引力辐射的存在。因而脉冲双星系统成为理想的引力理论的天空实验室。

脉冲双星的发现者是两位年轻人，他们在攀登当时脉冲星观测研究最高峰的实践中，“捕获”了这个罕见的“广义相对论天空实验室”。脉冲双星发现以来的 20 多年中，人们为搜寻更多的射电脉冲双星作出了巨大的努力。然而，只有 1974 年发现的 PSR1913+16 和 1991 年发现的 PSR1534+12 是检验广义相对论的最好的两个双星系统。幸运的是，首





次发现就"碰上"了最好的一个。这是难得的机遇，然而这种机遇只能属于在脉冲星巡天观测中辛勤耕耘并决心攀登科学高峰的人。

泰勒和赫尔斯毫不犹疑地认为脉冲双星PSR1913+16的发现具有极其重大的意义。爱因斯坦当初在他的广义相对论中预言，宇宙空间中应该存在引力辐射场及引力波。然而引力辐射极弱，目前还不可能在实验室发射可供探测的引力波，同时地球上的探测装置也从未探测到来自宇宙空间的引力波。因此，半个多世纪以来验证引力波一直是令科学家困惑的难题。泰勒教授意识到PSR1913+16双星系统的发现将可能解开这个谜。他全力投入到引力波验证的研究中，近20年坚持不懈。

这个特殊的脉冲双星系统的重要性在于它是双中子星系统，两颗子星间没有物质交流。它的轨道周期很短，仅7.75小时，两颗子星相距很近，轨道椭率很大，达到0.617。这些因素导致脉冲星具有非常高的轨道运动速度，可达光速的十分之一。根据广义相对论推算，这个双星系统的引力效应非常强。引力辐射将导致该双星系统轨道周期的明显变化，计算得出轨道周期的变化率为 -2.6×10^{-12}秒/秒。然而，要用实际观测来验证广义相对论的理论预言是极端困难的。第一个难点是，在观测上要测出轨道周期如此小的变化，脉冲到达时间的测量必须极端精密。1974年以后，泰勒和他的同事们不懈地追求这一目标，1974年的测量精度为300微秒，到1981

年就达到了15微秒,精度提高了20倍。第二个难点是,为了发现轨道周期的变化必须进行长期的观测。为此,泰勒教授奋斗了近20年(图9)。1978年11月测得的轨道周期变化率为 -3.2×10^{-12} 秒/秒,与理论值约相差20%,但是他们仍不满意这个结果。这种观测一直持续到获得诺贝尔物理学奖的1993年,经过近20年的努力,利用世界上最大的阿雷西博射电望远镜进行上千次的观测,使得精度进

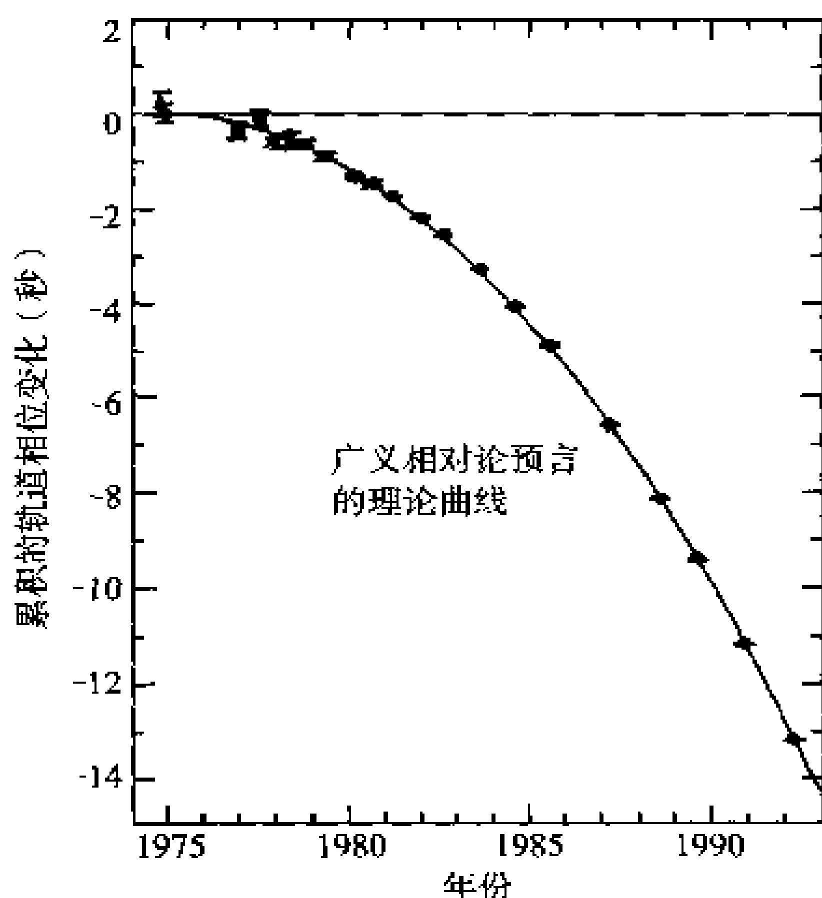


图9 射电脉冲双星 PSR1913+16 的轨道相位变化。17年的观测结果和根据引力辐射理论计算得出的变化曲线符合得极好





一步提高，观测值和广义相对论理论预期值的误差仅为0.4%。他们终于以无可争辩的观测事实，证实了引力波的存在，诺贝尔物理学奖属于他们已经是众望所归了。

5

宇宙微波背景辐射

大爆炸宇宙论的预言

1963年初，彭齐亚斯和威尔逊把一台卫星通讯接收设备改造为射电望远镜，进行射电天文学研究。他们不断提高测量的精度和降低系统的噪声温度，使天线温度测量值的总误差小到0.3K，从而发现了3.5K的宇宙背景辐射。这种辐射被确认是宇宙大爆炸时的辐射残余，从而成为大爆炸理论的重要观测证据。它对现代宇宙学的贡献仅次于哈勃发现河外星系的红移，被公认为20世纪天文学的一项重大成就。由此，彭齐亚斯和威尔逊获得了1978年度的诺贝尔物理学奖。瑞典科学院在颁奖决定中指出，这是一项带有根本意义的发现，它使我们能获得宇宙创生时期所留下的信息。

关于宇宙演化有一种比较公认的见解，称为热大爆炸模型。这个模型的最主要根据就是20世纪20年代末发现的哈勃定律。1929年，哈勃发现所有



的星系都在远离我们而去，越远的星系离去的速度越大，其退行速度和距离成正比（图 10）。这一切说明了宇宙正在膨胀，宇宙各部分正在彼此远离，它们相互远离的速度随着它们之间距离的增大而增大。



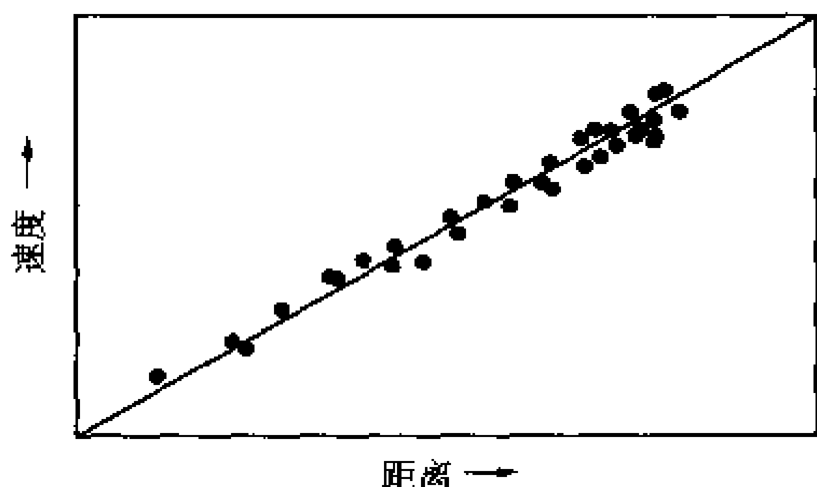


图 10 哈勃定律示意图。星系的退行速度和距离成正比说明宇宙在膨胀

类星体的发现更加支持宇宙膨胀的理论。类星体的光谱线具有非常大的红移，它们远在几亿光年、几十亿光年、甚至百亿光年以外。因此，我们看到的类星体其实是它们在几亿年、几十亿年、甚至百亿年前的形象。

宇宙膨胀的这种图景，很像一只嵌有许多葡萄干的巨大的面包，而包膨胀时，其中的葡萄干就会随之彼此远离；每一颗葡萄干都会看见其他所有的葡萄干都在离开自己。相距越远的葡萄干，彼此分离的相对速度也越大。把宇宙中的星系想象成面包中的葡萄干，有助于理解它们随宇宙膨胀而彼此远离的情形。在任何一个星系上，都会看到同样的景象。

河外星系目前正在彼此远离，它们在昔日就必定彼此比较靠近。往过去回溯得越久远，它们就挨得越近。如果回溯得极其古远，那么可以想象，我们这个宇宙中的全部物质都将挤在一个极小极小的范围里。1927 年，比利时天文学家勒梅特(Abbé Georges Édouard Lemaître)把当初那个包含宇宙中全部物质的天体称为原始原子。原始原子很不稳定，在一场极其猛烈的爆发中炸成无数碎片。这些碎片变成了无数的星系，它们至今仍在继续向四面八方飞散开去。

1948 年，俄裔美国物理学家伽莫夫(George Gamow)发展了这种想法。他计算出爆炸之初的温度，还计算了随着宇宙的膨胀温度下降的快慢，计算了应该有多少能量转化成各种基本粒子，后来又怎样变成了各种原子。根据宇宙膨胀的状况推算，上述大爆炸发生在约 150 亿年前。

从热大爆炸宇宙论出发可以推出许多重要结论，它们需要天文学观测加以检验。倘若将大爆炸的瞬间算做宇宙年龄为零，那么随着宇宙的膨胀，到宇宙年龄为 1 秒时，温度已降到 100 亿开。当时还不可能存在任何天体，甚至除氢核——质子外，没有任何别的化学元素。那时只有由质子、中子、电子、光子等基本粒子混合而成，处于热平衡状态下的“宇宙汤”。

在“宇宙汤”中，中子数和质子数起初近乎相等，随着温度的降低，两者的比例逐渐下降。到宇宙年





龄约为3分钟时，中子数和质子数之比达到1:6左右。这时，宇宙的温度已降到10亿开，中子和质子开始反应，合成由1个质子和1个中子构成的氘核。类似氢弹爆炸的核聚变过程，又把所有的中子迅速合成到由2个质子和2个中子构成的氦核中，致使宇宙间氦与氢的质量之比为1:4。日后在恒星上发生的核合成过程也会导致氢核聚变为氦核，但由此产生的氦不多，对氦丰度——即相对于氢的比例的贡献不超过0.05。天文实测表明，无论在宇宙中的什么地方，氦与氢的比例确实都与上述数值基本一致。这一时期中合成的其他轻元素，如氘、氚、锂、铍、硼等，数量虽少，但它们的丰度在宇宙各处也都符合大爆炸理论的预期值。所以，轻元素丰度是大爆炸宇宙论的又一有力佐证。

在大爆炸后的40万年间，温度很高，辐射很强，光子充满了宇宙空间。但是，这时宇宙中也充满了带电粒子，如质子、电子、氦原子核等。光子和带电粒子之间的相互作用非常强，使得光子不能自由地传播，因此我们不可能观测到这个时期的辐射。到40万年以后，宇宙的温度降到4000K，这时质子和电子复合为中性氢原子，氦核和电子复合为中性氦原子，等离子体转变为中性气体，宇宙进入复合期。

复合期以后，光子是在中性气体中传播，不再遭受带电粒子的相互作用，可以说宇宙变得透明了，光子自由自在地传播，在宇宙空间走了上百亿年，终于到达我们这里，成为我们可以观测到的宇宙中最远

古的遗物。这就是3K的宇宙微波背景辐射。宇宙复合时代发出的辐射温度为4000K，到今天为什么变成了3K的微波辐射呢？这是因为，宇宙经过上百亿年的演化已经大大地膨胀了。随着宇宙的膨胀，一切尺度都在增大，光的波长也在变长，从可见光变到射电的微波波段，相应的黑体辐射温度也降为大约3K了，伽莫夫的两个研究生阿尔弗（Ralph Asher Alpher）和赫尔曼（R.C.Herman）首先在1948年经过计算得出的这样的结论，只是当时计算得到的背景辐射温度为5K。

迪克错失发现良机

可惜，伽莫夫、阿尔弗和赫尔曼的预言并没有受到学术界的重视，被搁置了10多年。他们本人也没有进一步完善自己的理论，而且也不关心天文学的观测。实际上，那时已有一些观测显示出存在宇宙微波背景辐射的迹象。

既然宇宙在复合期留下的辐射到今天已处在射电的微波波段，发现这一辐射的观测手段当然只能是射电望远镜了。在20世纪40年代，射电望远镜所用的天线都比较小，接收机的噪声温度也比较高，因此灵敏度是不高的。1945年，美国麻省理工学院的迪克（Robert Henry Dicke）研制了一台波长为1.25厘米的射电望远镜，其抛物面天线的口径仅45厘米。他用这台射电望远镜观测太阳和月球的射电辐





射。在这样的波段上,地球大气也有辐射,而且还比较强。为了扣除大气辐射的影响,迪克转而对 1.25 厘米波段上的大气辐射进行精确的测量,却意外地发现了温度为 20K 的"天空背景辐射"。他认为,这种辐射并非来自地球大气,而很可能是广泛分布在宇宙空间中的各种星系的射电辐射构成的背景,他把这种辐射称之为"宇宙物质辐射"。

实际上,这种辐射就是后来发现的微波背景辐射,只是当时射电望远镜的测量精度不高,人们对大爆炸宇宙模型也不太熟悉,迪克未能把他的发现和微波背景辐射联系起来。很有意思的是,迪克关于"宇宙物质辐射"的观测结果和伽莫夫关于"核合成"的一篇论文,都发表在 1946 年的《物理学评论》第 70 卷上。但直到 20 年后,人们才发现这两篇论文之间的密切关系。如果那时伽莫夫拜读了迪克的论文,很可能会把迪克的观测发现和他们预言的"宇宙微波背景辐射"联系起来。如果迪克去读一下伽莫夫等的论文也可能有所启迪,那么发现 3K 宇宙微波背景辐射的机遇就不会留给彭齐亚斯和威尔逊了。迪克失去了一次发现宇宙微波背景辐射的绝好机会,伽莫夫等人也失去了一次验证其理论的机会。

1946 年,迪克回到他毕业的普林斯顿大学任教。到了 20 世纪 60 年代初,迪克转向研究宇宙学,但是他不相信伽莫夫提出的大爆炸宇宙学。他心目中的宇宙模型是永久振荡模型,即认为宇宙是反复



彭齐亚斯

地膨胀和收缩的，目前的宇宙正处在膨胀阶段。他猜想宇宙在“振荡”过程中会留下可观测的背景辐射。迪克让他的研究生皮布尔斯（P. J. E. Peebles）计算振荡模型里宇宙温度如何随演化而改变。很有意思的是，他们的结果也认为宇宙中充满着一种温度为10K的背景辐射。迪克终于想起了20年前他发现的温度为20K的“宇宙物质辐射”，认为这种辐射可能就是“振荡”过程中留下的微波背景辐射。1964年，迪克鼓励两位研究生去寻找这种辐射，他们为此研制了射电望远镜。可是还没有等正式观测，却有人捷足先登了。那就是后来获得诺贝尔物理学奖的彭齐亚斯和威尔逊。迪克再一次失去发现良机。

还有一人也和这次发现宇宙微波背景辐射擦肩而过，他就是彭齐亚斯和威尔逊的同事、工程师奥姆（E.A.Ohm）。奥姆用贝尔实验室的喇叭状天线进行测量时，曾发现有3.3K的多余噪声温度，测量结果于1961年发表在《贝尔系统技术杂志》上。只是这个多余的噪声温度小于实验误差，而且对通信亦无妨碍，因此没有受到人们的注意。





射电天文绝对测量

1933年4月26日，彭齐亚斯出生在德国慕尼黑的一个犹太人家庭。1933年全家离开德国去英国，后又到美国定居。1954年他在美国纽约城市学院毕业，获物理学学士。后来进入哥伦比亚大学当研究生，1962年获博士学位。他的导师汤斯教授是一位对微波激射和激光有特殊贡献的物理学家，而且还是分子天文学的创始者。彭齐亚斯研制了一个21厘米波段上的微波激射放大器，目的是要观测星系际氢原子的一条波长为21厘米的谱线。此举虽未成功，但他和汤斯一起的这番尝试，使他念念不忘射电天文学。1961年，他在获得博士学位之前就到贝尔实验室工作，从此开始了他对射电天文学的追求。

1936年1月10日，威尔逊出生于美国的休斯敦。他从小就对电子学感兴趣，1957年在赖斯大学获学士学位，所有课程的成绩都属优秀。1962年，威尔逊在加州理工学院获物理学博士学位。他的博士论文课题是对银河系进行射电巡查，绘出气体氢云的分布图。因为澳大利亚的天文学家已在这之前完成了类似的观测，所以他对自己的论文不甚满意。但是，通过做博士论文，他结识了许多射电天文学家，特别是从此爱上了射电天文学。1963年，威尔逊进入贝尔实验室工作。那是射电天文学发展的摇

篮，射电天文学奠基人央斯基就是在这里发现来自银河系的射电辐射的。

彭齐亚斯和威尔逊都是向往射电天文研究的良好条件而先后来到贝尔实验室的。1960年，贝尔电话公司正在执行通信卫星的计划，克劳福德(A.B. Crawford)和他的同事们建造了一具口径6.1米的喇叭状反射天线。这种天线具有非常强的方向性，几乎不受来自地面的无线电和热辐射的干扰(图11)。这个天线和一台低噪声微波辐射计一起用来接收"回声号"卫星上反射回来的信号。这些卫星实际上是一些比较大的金属球，能反射射电信号，用这种方法来进行世界各地的通信。由于卫星上没有放大信号的装置，所以反射回来的信号十分微弱，这就要求地面上有很好的天线和放大系统来捕捉金属球反射的微弱射电信号。微波辐射计采用的红宝石微波激射放大器用液氦冷却到4.2K以下，噪声很低。喇叭

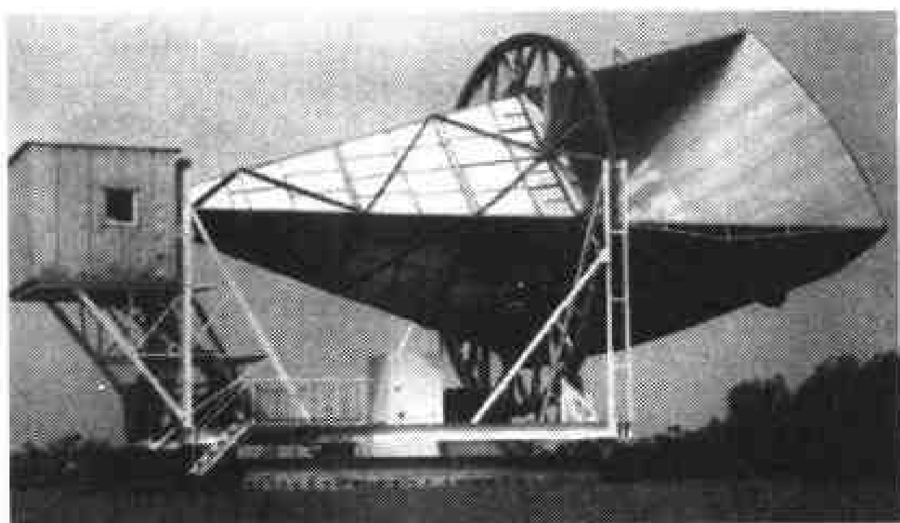


图11　贝尔实验室的口径6.1米的喇叭状反射天线，彭齐亚斯和威尔逊用这个天线发现了宇宙微波背景辐射



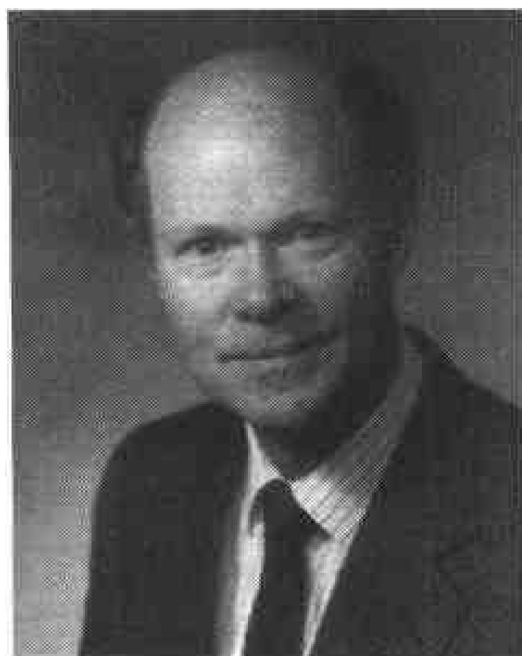


状天线和这种微波辐射计一起组成一台灵敏度很高的射电望远镜。后来有了通信卫星，放置在克劳福德山上的这台射电望远镜就失去了作用。彭齐亚斯和威尔逊如获至宝，获准用来进行射电天文研究。

1963年，彭齐亚斯和威尔逊开始将6.1米喇叭状反射天线接收系统用于宇宙射电源的绝对测量，也就是绝对定标。天体的射电流量密度是天体射电辐射的最基本的特征。然而，要准确地测定天体的流量密度却不容易。射电天文观测的定标有两种：绝对定标和相对定标。绝对定标是用绝对方法测量出射电源在各个频率上的流量密度；相对定标则是采用与已知的标准源比对的方法，来确定射电源的流量密度。如果有了一批经过绝对定标的射电源，那就为射电天文观测提供了非常便利的条件。

绝对定标中最关键的是测定天线的有效接收面积，这在天线工程中也是非常困难的。但是，喇叭状天线对于“绝对测量”却是很理想的天线，因为它的灵敏度和接收面积都可以精确地计算。这一点是常用的抛物面天线不具备的。6.1米喇叭状天线的接收面积虽然不大，但可以精确测量一批较强的射电源的流量密度，以作标准源。特别是，原来放置在距喇叭状天线约1千米处的一台发射机，还可以用来作辅助的测量。

彭齐亚斯和威尔逊为了进行绝对测量，首先对喇叭状天线的有效接收面积进行了精密测量。同时还研制了一台波长为7.35厘米的低噪声微波激射



威尔逊

放大器。为了用射电望远镜测量一个地球之外射电源的强度，必须把来自射电源的信号与接收机噪声、地面噪声、地球大气噪声以及天线本身的噪声区分开来。采用的方法是轮流把天线指向射电源和源附近的天空背景，把两者的信号相减就可以消去噪声。当然，噪声功率本身的起伏是去不掉的，它成为对灵敏度的一种限制。精确的测量必须要弄清楚望远镜系统噪声的来源，如天线、波导、微波激射放大器、转换器等等的贡献，因此必须非常仔细地对射电望远镜各个部分进行精确的测量和检查。

彭齐亚斯和威尔逊并没有刻意要发现什么，他们只是为了要对几个射电源进行精密的绝对测量，而精心地把射电望远镜装置调整得尽可能更好些。这一决定性的步骤为他们偶然发现宇宙微波背景辐射准备了条件，而这种偶然又寓于必然之中。

微波背景辐射发现始末

1964 年 5 月，彭齐亚斯和威尔逊开始了他们的射电天文绝对测量研究。他们研制的辐射计装备了





噪声非常低的红宝石微波激射器，因此灵敏度有了保证。在正式工作之前，必须精确测量天线本身和背景的噪声，为此他们把天线与一个参考噪声源相比较。他们用液氦致冷的一段波导管作参考噪声源，因此噪声温度很低。

将喇叭状天线对准没有射电源的天空时，测得的噪声温度为7.5K。扣除大气贡献的2.3K和来自地面及天线四壁贡献的1K，还剩下4.2K的温度。无论天线指向什么方向，也不管是哪一天的观测，这个剩余的噪声总是存在，既无周日变化，也无季节性变化。这使彭齐亚斯和威尔逊十分烦恼，因为不把原因找出来，就无法进行射电源的绝对测量。最初他们怀疑是天线和接收机系统的问题，便对天线进行了彻底的检查。他们检查了接收机的各个部件，清除了天线上的一个鸽子窝，结果情况没有变化，剩余的噪声还是存在。排除了来自射电望远镜本身的可能性后，他们继续考察剩余噪声是否可能来自银河系晕及射电点源？抑或是对大气的贡献估计不足？彭齐亚斯和威尔逊用了差不多一年时间，细心查证或实验，证明这种剩余噪声不是来自银河系晕，也不是射电点源及大气的贡献。最后，他们在1965年进行了一次更为小心翼翼的测量，以确定多余的噪声温度是否来自地面辐射。他们用喇叭状天线测量放置在地面上不同地方的发射机发射来的电磁波，特别是对天线方向图的后瓣进行重点测量。结果发现天线后瓣接收到的辐射和预期的一样低，这

表明地面对天线温度的贡献可以忽略不计。排除了种种可能的因素以后，只能认为剩余噪声是来自宇宙空间的某种辐射。

根据他们第一次公布的数据，可以看到他们对天线各项噪声的等效温度所作的具体分析：大气辐射温度为2.3±0.3K，天线和波导器件损耗温度为0.8±0.14K，后瓣温度小于0.1K。这样算来，天线的等效噪声温度只有3.2±0.7K。把总的天线温度6.7±0.3K减去上述各项噪声源的温度，多余的噪声温度为3.5±1K。这个剩余的噪声温度是各向同性、无偏振和没有季节变化的。1K并不是测量误差，它是把每项来源的最大误差加起来的结果。实际的误差大约为0.3K。

彭齐亚斯和威尔逊发现了“剩余的噪声温度”，却不知道它是什么。甚至当别人告诉他们，它可能是宇宙背景辐射后，他们还是不相信。富于戏剧性的是，就在离他们的实验室不远的普林斯顿大学，实验天体物理学家迪克正领导着一个小组从事旨在发现宇宙背景辐射的工作。他们研制了一台波长为3.2厘米的射电望远镜，可是还没有来得及观测，就听到彭齐亚斯和威尔逊已经发现了他们梦寐以求的宇宙微波背景辐射。当然，他们很快也观测到了这种辐射，仅仅慢了一步。迪克虽然感到遗憾，但他对彭齐亚斯和威尔逊的发现赞叹不已，其兴奋程度甚至超过了发现者自身。不管是谁发现宇宙微波背景辐射，宇宙起源和演化的一个大问题终于解决了，这





是每一个天文学家都要庆祝的。他们没有任何嫉妒之心,反而伸出友谊之手帮助与自己竞争的胜利者。

迪克和他的同事们来到克劳福德山,与彭齐亚斯和威尔逊进行交流。迪克小组相信彭齐亚斯和威尔逊测量到的正是他们要寻找的宇宙微波背景辐射。双方商定同时在《天体物理学杂志》上发表自己研究结果的简讯。一篇是迪克小组的理论文章“宇宙黑体辐射”,另一篇是彭齐亚斯和威尔逊的实验报告,题为“在4080兆赫上额外天线温度的测量”。他们在这篇报告中只是说:“发现的额外噪声温度约为3.5K。这个额外的温度是各向同性的,非偏振的,并且没有季节性变化”,而不谈与宇宙微波背景辐射的可能联系。只有把这两项各自独立的研究成果一起读完,才能体会出这一观测发现的宇宙学意义。

这篇仅600个单词的论文,被认为是继1929年发现哈勃定律之后天体物理上的又一重大发现,是对大爆炸宇宙论的重大支持。后来,射电天文学家们又在多次观测中进一步证实了彭齐亚斯和威尔逊的发现。

进一步证实

从1965年彭齐亚斯和威尔逊发现宇宙微波背景辐射到1978年瑞典皇家科学院把诺贝尔奖授予这两位科学家,一共经历了12年的时间。这项发现之所以登上科学的顶峰,不仅有在他们之前的诸如

伽莫夫、阿尔弗、赫尔曼、迪克等在理论和观测上的贡献，还有在确认"剩余的噪声温度"的来源之后，一批天文学家进一步证认的结果。

根据理论分析，宇宙微波背景辐射在不同频率处的光辐射能量密度分布应服从普朗克定律，也就是黑体谱。因此检验这种辐射在不同波长的能量密度是否果真符合普朗克分布定律，乃是对用宇宙学起源解释天线的多余温度的重要考验。

1965 年发现宇宙微波背景辐射是在 7 厘米波长上的观测结果，为了证实这种辐射是黑体谱，需要在 70 厘米到毫米波的广阔频段范围进行测量。1965 年 12 月，迪克小组的罗尔(P. G. Roll)和威尔金森(D. T. Wilkinson)完成了他们在 3.2 厘米波段的测量，结果是 3.0 ± 0.5K。不久，豪厄尔(T. F. Howell)和谢克沙夫特(J. R. Shakeshaft)在 20.7 厘米上测得 2.8 ± 0.6K。随后彭齐亚斯与威尔逊在 21.1 厘米上测得 3.2 ± 1K。但从 3K 黑体分布理论曲线看出，辐射强度峰值在波长为 0.1 厘米附近。以上测量只能拟合部分理论曲线。当务之急是要取得比 0.1 厘米更短的波长处的观测资料。

0.1 厘米处于远红外范围，大气对它的吸收强烈，所以只能在大气外进行观测。1972 年，康内尔大学的火箭小组和麻省理工学院的气球小组分别进行观测，证实背景辐射在远红外区域有相当于 3K 的黑体辐射分布。1975 年，加州大学伯克利分校的伍迪(D. P. Woody)领导的气球小组给出从 0.25 厘米





到0.06厘米波段的背景辐射符合2.99K的黑体辐射分布曲线。至此,观测数据已肯定宇宙微波背景辐射具有温度约为3K的黑体谱。

1989年,美国国家宇航局发射专用的宇宙背景探测器(COBE)卫星。它观测到的宇宙微波背景辐射谱与温度为2.726K的黑体辐射谱符合得极佳(图12)。这种辐射均匀,高度各向同性,说明宇宙是相当均匀的。另一方面,根据大爆炸宇宙论,这种辐射也还应该有很少一点儿各向异性。20世纪90年代中期的观测给出,宇宙微波背景辐射在数弧分的几何尺度上温度起伏的上限为$\Delta T/T < 2 \times 10^{-6}$。天文学家们希望新的观测能够发现这种各向异性。

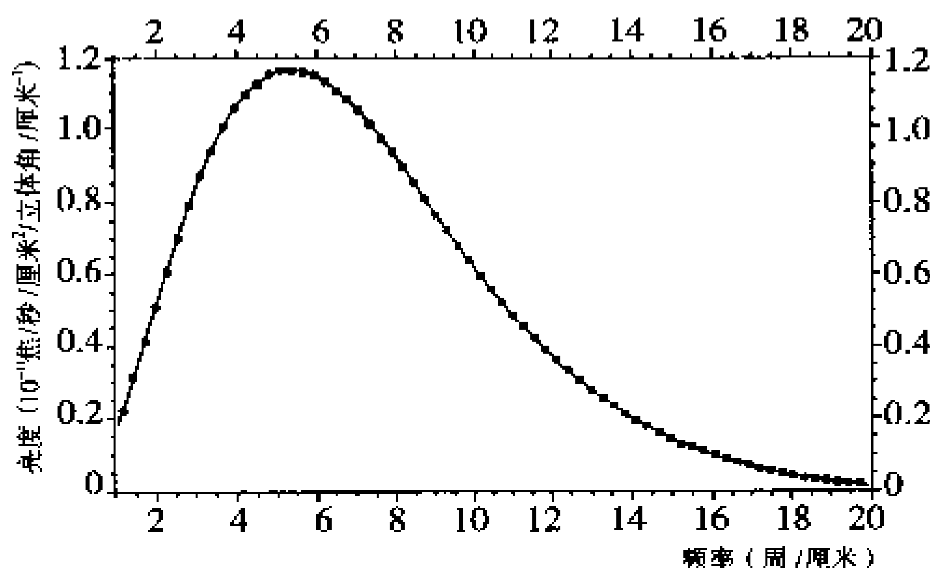


图12　美国宇宙背景探索器(COBE)卫星在多波段上观测到的背景辐射谱和温度为2.726K的黑体辐射谱符合极佳

回顾宇宙微波背景辐射的发现,彭齐亚斯和威尔逊刚开始射电天文学研究就取得如此举世瞩目的成就,那当然是极令人敬佩和羡慕的。同时,我们也

不应忘记预言宇宙微波背景辐射存在的伽莫夫、阿尔弗和赫尔曼以及寻找这种辐射的先行者迪克等人的卓越贡献。



6

恒星的结构和演化

恒星的一生

钱德拉塞卡是一位伟大的天体物理学家。他对恒星内部结构理论、恒星和行星大气的辐射转移理论、星系动力学、等离子体天体物理学、宇宙磁流体力学和相对论天体物理学等都有重要贡献。1983年在他73岁的时候因“对恒星结构及其演化理论作出的重大贡献”而获得诺贝尔物理学奖，这是他在20世纪30年代年青时完成的研究成果。他的理论经受了半个世纪天体物理学发展和天文观测的考验，成为20世纪天文学最伟大的成就之一。

恒星内部结构的研究始于20世纪初，1907年埃姆登(Robert Emden)的专著《气体球》总结了早期的研究。1916年至1926年该项研究取得重要进展，其中大部分工作是英国著名天文学家爱丁顿完成的。可以说，爱丁顿是恒星结构的奠基人。他在1926年出版的《恒星内部结构》成为这一领域的经典性





著作。

恒星是由弥漫的星际云在引力作用下逐渐形成的。一个质量足够大的低温星际云,因自身的引力而不断收缩,导致中心的密度加大,体积缩小。在收缩过程中,大量物质以自由落体的方式向其质量中心下落,巨大的引力势能转换为动能,导致温度升高,开始辐射红外线。高温产生的向外的辐射压力与引力相对抗的能力逐步增强。当中心的温度达到1000万开左右时,氢核聚变为氦核的反应就持续不断地发生。由于核反应产生巨大的辐射能使恒星内部的压力增强到足以和引力相抗衡,恒星不再收缩。这时,恒星进入一个相对稳定的时期,成为恒星演化史中的主序星阶段。

恒星是相当稳定的炽热气体结构。它们处于流体静力学平衡状态,满足质量、动量和能量守恒,由热核反应不断产生能量,经辐射转移或对流把能量传输出来。恒星内部结构主要由它的质量、化学成分和演化阶段来决定。恒星的一生始终处在向内收缩和向外膨胀的矛盾之中。引力使其收缩,辐射压力使其膨胀。某些时候,其中一种力占上风,恒星便呈现为膨胀或收缩。主序星阶段恒星是靠其内部氢核聚变反应提供能源而维持平衡的。由于恒星内部含有大量的氢,氢核聚变反应可进行相当长的时间,所以恒星在主序星阶段停留时间很长。质量不同的恒星在主序星阶段的时间很不相同。质量愈大的恒星氢消耗得愈快,在主序星阶段停留的时间就愈短。

一旦核能耗尽，恒星将会因抵抗不住引力而收缩下去，直到出现一种新的、更强大的向外的力来抗衡引力，才能达到新的平衡。过了主序星阶段之后，恒星中心部分的氢已经全部转化为氦，中心部分以外的区域则由于温度的增高而开始氢核聚变反应。核反应迅速向外层转移，推动外层膨胀，使得恒星体积很快增大成千上万倍。这样，就变成又大又红的红巨星。红巨星中心的温度很高，开始发生氦聚变为碳的核反应。过了红巨星阶段之后，恒星便进入了老年期。老年恒星的重要特点就是不稳定。恒星的老年期比较短，氦聚变为碳，碳聚变为氧和镁，氧聚变为氖和硫，核反应一个接着一个，最后全部变成铁。核反应停止，核能耗尽。这时，恒星内部温度高达60亿开，发生极强的中微子辐射，带走大批能量，恒星内部压力大大降低，远远不能与引力相抗衡。引力主宰一切，恒星就要坍缩，崩溃势在必然。什么力量能使坍缩停止？恒星晚期演化的归宿是什么？在20世纪初的那个年代，天文学家并不清楚。后来的研究认为，在经过了各种演化历史以后，按照恒星质量的大小不同，分别演化为白矮星、中子星或者黑洞。

天狼B星之谜

天狼星是全天最亮的恒星，随着天狼星之谜不断地被揭开，恒星天文学渐渐地得到了发展。早在





1718年,英国天文学家哈雷(Edmond Halley)通过测量天狼星位置发现它有自行,1836年,德国天文学家贝塞尔(Friedrich Wilhelm Bessel)发现天狼星的自行呈波浪式的变化,并由此推断天狼星有一颗看不见的伴星,其轨道周期约为50年(图13)。在贝塞尔那个时代,天文学家并不知道恒星的能源是恒星内部的热核反应,更不知道恒星晚期演化的归宿之一是致密的白矮星。

1862年,美国望远镜制造家阿尔万·格雷厄姆·克拉克(Alvan Graham Clark)用他新研制的望远镜观测天狼星,发现在天狼星附近有一个很小的光点,最后确认它就是天狼星的伴星,称为天狼B,而天狼星则改称天狼A。天狼B是一颗暗星,其亮度比天狼A差10个星等,光度相差1万倍。当时,人们以为天狼B是一颗冷而小的恒星,但是光谱观测表明它是一颗热星,表面温度比太阳的6000K还要高,达到8000K。由于光度是和恒星的表面积成正比的,天狼B如此之暗的原因只能归之为天狼B的表面积特别小,推算出的直径只比地球稍大。虽然,天狼B的大小和太阳系的行星相当,但是其质量却和太阳差不多。观测发现这颗体积很小的恒星的引力能使天狼A的自行运动呈波浪式,而这只有当天狼B的质量很大时才有可能。后来的计算给出天狼A的质量是2.4个太阳质量,天狼B则具有0.98个太阳质量。这样一来,这颗伴星的平均密度必定会超过10^6克/厘米^3。当时人们都不敢相信恒星有如此高的密

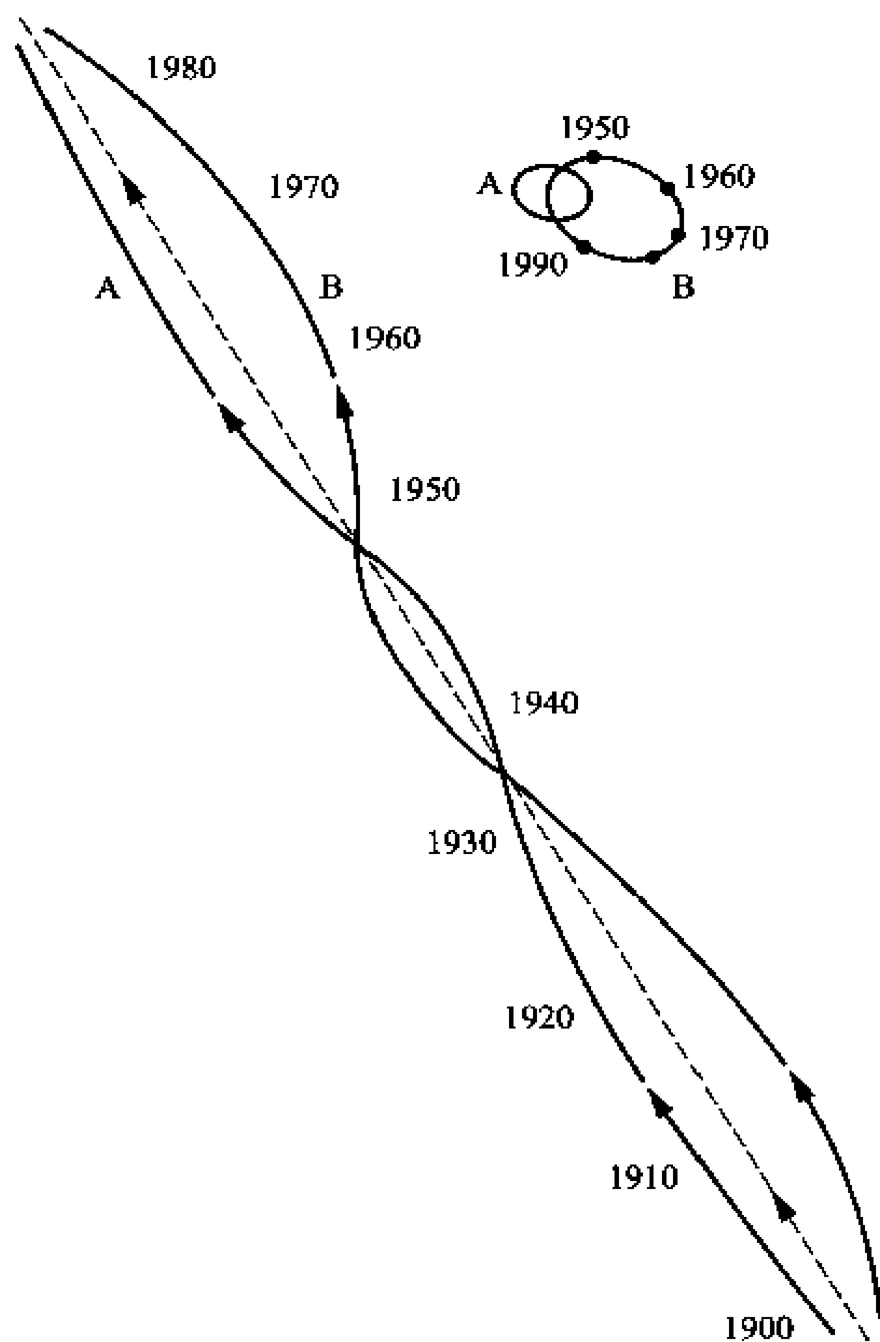


图 13　天狼 A 和 B 自 1900 年以来的波状曲线运动

度，天狼 B 便成了一个令人困惑的谜。

20 世纪 20 年代，天狼 B 成为天文学家感兴趣的中心之一。当时的物理学原理还不能解释白矮星的高密状态是怎样形成的。我们知道，中子星的理论





远远地走在观测之前,物理学家在预言中子星存在以后30多年,才在观测上偶然地发现了中子星。然而,白矮星的观测发现却走在理论的前面,使得当时的物理学家无言以对。

1924年,爱丁顿最早对于这类恒星提出自己的看法。他认为这种恒星内部的温度非常高,原子都被电离成电子和原子核,这些粒子的体积比原子小得多。由于高度压缩,天狼伴星的直径变得比天王星这颗行星还要小,其密度却高达53 000克/厘米^3。正因为它的表面积太小,所以往外辐射的总能量就比普遍恒星少得多。他称这样的恒星为"白矮星"。"白"是指温度高,呈白色;"矮"是指"个儿小",光度低。爱丁顿虽然正确地指出白矮星是致密星,但是他的解释是基于经典物理,他认为原子被电离为原子核和电子,这些粒子之间仍然有很大的间隙,仍可采用理想气体物态方程来处理白矮星的内部结构问题。这显然是不正确的。

多数天文学家并不支持爱丁顿关于天狼B星具有非常高的密度的想法。从爱因斯坦建立的广义相对论知道,在强引力场中谱线会产生红移。在太阳表面引力并不太强,只比地球表面引力大28倍,不足以产生明显的引力红移。天狼B很小,其表面引力很大,是太阳的840倍,引力红移就比较明显了。爱丁顿建议正在研究天狼B的亚当斯(Walter Sydney Adams)进一步分析它的光谱。结果不出爱丁顿所料,亚当斯于1925年测出了这种红移,而且红

移量与用爱因斯坦理论计算得到的结果一样。这一观测证实了天狼 B 的确是一颗质量大而体积小的致密星。从此，人们不再怀疑白矮星的存在了。

勤奋好学的钱德拉塞卡

钱德拉塞卡 1910 年 10 月 19 日出生于今属巴基斯坦的拉合尔。1916 年，全家迁居印度的马德拉斯。他后来进入马德拉斯大学学习物理和数学。1930 年，钱德拉塞卡 20 岁时以全班第一的成绩大学毕业。

他在大学学习的那个年代，正值从经典物理学到现代物理学转变的时期。新的理论、新的学说和新的概念一个接一个地出现。1915 年，爱因斯坦发表广义相对论，代表了一种崭新的宇宙观；1911 年，卢瑟福(Ernest Rutherford)提出原子模型，两年后玻尔(Niels Hendrik David Bohr)将普朗克(Max Karl Ernst Ludwig Planck)的量子理论运用到原子的研究上，发展了卢瑟福的学说；1925 年春，年仅 25 岁的泡利(Wolfgang Pauli)提出新的物理学原理——不相容原理，他为此在 1945 年荣获诺贝尔物理学奖；20 年代中期，量子统计学诞生了，按费米—狄拉克统计法得出的规律与经典物理的统计得到的图象大不相同。这些物理学的最新进展不可能及时成为大学教科书的内容，年青的大学生钱德拉塞卡如饥似渴地自学这些近代物理学知识。1927 年暑假期间，17 岁的钱



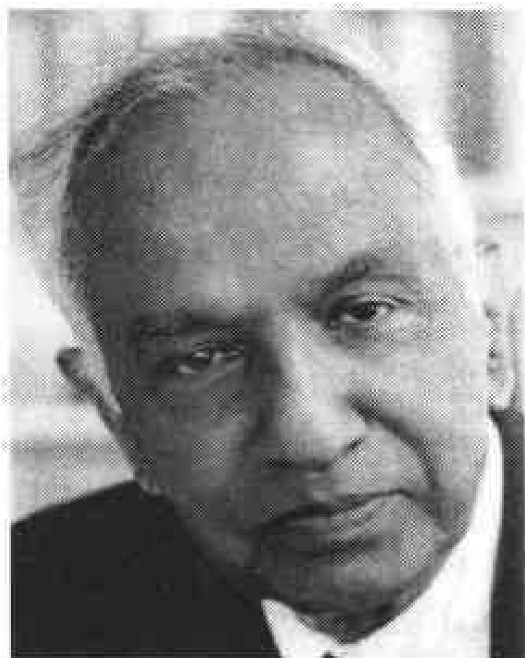


德拉塞卡就阅读了第一流的物理学家海森伯(Werner Karl Heisenberg)、狄拉克(Paul Adrien Maurice Dirac)、泡利等人的论文和索末菲(Arnold Sommerfeld)的名著《原子结构和光谱线》。他对费米(Enrico Fermi)的量子统计理论以及拉尔夫·福勒(Ralf Howard Fowler)将这种理论用于研究"白矮星"的结构特别感兴趣。这为他以后全心身地投入白矮星的研究做了物理学理论的准备。

1928年,德国物理学家索末菲来到他们大学讲授有关量子统计学等物理学的进展,钱德拉塞卡听后,立即尝试把量子统计理论应用到白矮星上,得到很有意义的结果。他发现简并电子的压力和密度的三次方成正比,而不像理想气体那样只和密度的一次方成正比。特别有意思的是,他的计算结果表明,白矮星的半径是与质量的立方根成反比。这是他研究白矮星的习作,虽有不完善的地方,但其结论基本上是对的。

他不光注意学习最现代的物理学、天体物理学,而且从17岁开始就试图用物理学的知识来解决天文学上的难题。他18岁时就有一篇题为"康普顿散射和新统计学"的论文发表在1928年的英国《皇家学会论文集》上。这一论文引起剑桥大学老师的兴趣,为他到剑桥大学攻读理论物理学研究生牵了线。

1930年7月31日,钱德拉塞卡大学毕业。他被英国剑桥大学录取为研究生。在去英国的远航轮船上,在3个月的航程中,他虽然被晕船困扰着,但丝


钱德拉塞卡

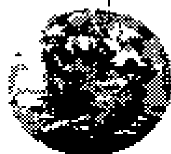
毫没有放松自己的学习。爱丁顿的《恒星内部结构》、康普顿(Arthur Holly Compton)的《X射线和电子》,以及索末菲的《原子结构和光谱线》等名著是他的随身携带之物。

1930年至1936年,钱德拉塞卡在剑桥大学学习和工作期间,根据相对论和量子力学的原理,利用简并电子气体的物态方程,为白矮星的演化过程建立了合理的模型。1934年,他完成了两篇白矮星的学术论文。他得出一个始料未及的重要结果:白矮星的质量越大,其半径越小;白矮星的质量不会大于太阳质量的1.44倍;质量更大的恒星必须通过某些形式的质量转化,也许要经过一场大规模的爆发,才能最后归宿为白矮星。

钱德拉塞卡的白矮星理论和爱丁顿从经典物理出发导出的理论格格不入,也和拉尔夫·福勒的学说不同。钱德拉塞卡的理论解释了恒星演化的最后过程,因此对恒星演化学作出了重大贡献。

白矮星的形成

白矮星在赫罗图上远离主序星,是一种光度低但温度高,大小近于行星而质量近于太阳的恒星,其





密度高达 $10^5 \sim 10^7$ 克/厘米^3。在主序星内部,与引力抗衡的是气体压力和辐射压力。这两种压力都具有热的性质,主要靠恒星内部的热核反应释放出来的热能来维持。白矮星则是热核反应停止以后恒星的一种稳定结构。热核反应一停止,引力便占上风,恒星就要收缩,直到有一种能与引力抗衡的力出现,才能使恒星稳定下来。这种力就是简并电子气的压力,简称简并压力。

我们知道,原子由原子核和核外的电子组成。原子的全部正电荷和几乎全部的质量都集中在原子核里。带负电的电子在原子核外绕核旋转。原子很小,其直径的数量级是 10^{-8}厘米;原子核更小,尺度仅 10^{-13}厘米的数量级。当恒星内部的热核反应停止以后,辐射压大大降低,远远不能与引力相抗衡,必然导致恒星坍缩,温度升高,密度加大。高温使得原子核外的电子全部电离,变成赤裸裸的原子核,所有电子都成为自由电子。坍缩的结果使它的密度提高了 $10^4 \sim 10^5$ 倍,导致恒星的直径大大减小,变得和行星差不多大小。

在密度非常高的情况下,电子、质子和中子气体已不能用经典物理理论规律来解释。它们遵从量子力学的规律而被称为简并气体。在经典物理中,粒子和波是完全不同的,每个粒子具有确定的位置和速度。但是,在量子力学中,光既具有波的性质又具有粒子的性质,这就是波粒二象性。另一方面,一切粒子,包括电子、质子和中子也都具有波动性。粒子

的位置和速度遵从“不确定关系”，也就是说，我们在任何一个特定时刻都不可能同时准确测定一个粒子的位置和它的动量。如果粒子位置的不确定性很小，那么粒子动量就有一个很大的可能范围；反之，如果粒子动量的不确定性很小，那么粒子位置就有一个很大的可能范围。由于坍缩恒星的密度大为增加，体积大为缩小，于是其中的电子位置都局限于很小的范围内，这样，电子的动量就有很大的不确定性；因此，电子可以具有很大的动量。

我们知道，在原子中，或在一团电子气体中，电子具有的能量状态并不是连续的，而是只能取某些特定的值。我们可以用表示能量、轨道角动量、自旋角动量等特征的一组量子数来描述电子所处的状态。而每一个这样的状态，又只容许一个电子占有。这就是量子力学中非常重要的“泡利不相容原理”。所以，对于多电子体系，电子只能按能量从低到高的顺序依次充填各个能量状态。低能态的占满了，就只能到高能态去。于是，当电子密度很高时，必然有很多电子处在高能态，具有非常高的速度，产生非常高的简并电子气压。电子具有非常高速度并不是因为温度高，而是因为低能态已被别的电子占据了，其他的电子只能跑到高能态上去。因此高能电子数目的多少和温度无关，而仅仅由电子的密度决定。

理想气体的气体压力是温度和密度的函数。简并电子气体具有完全不同的物态方程。在密度不是特别高的情况下，电子速度比光速要小很多，这时称





为非相对论简并电子气，其简并电子气压与密度的5/3次方成正比，与温度无关。当密度增加，简并电子气压比理想气体压增长得快得多。所以在密度很高时，简并压力可以远远超过通常的气体压力，从而可以对抗强大的引力，形成稳定的白矮星。

在非相对论性简并电子气情况下，可以导出白矮星的质量—半径关系为 $R \propto M^{-5/3}$，白矮星的质量越大则它的半径越小(图14)。这导致1个太阳质量的白矮星半径只有太阳半径的1%。这和我们所熟悉的正常恒星的质量—半径关系完全不同。白矮星能保持稳定的原因就在这里。假如白矮星的质量略有增加，引力当然也随之增加，这时恒星的半径减小，使密度增加，导致简并电子气压力增加，所以仍然维持平衡状态。

但是当密度更高时，情况就发生了变化。按照

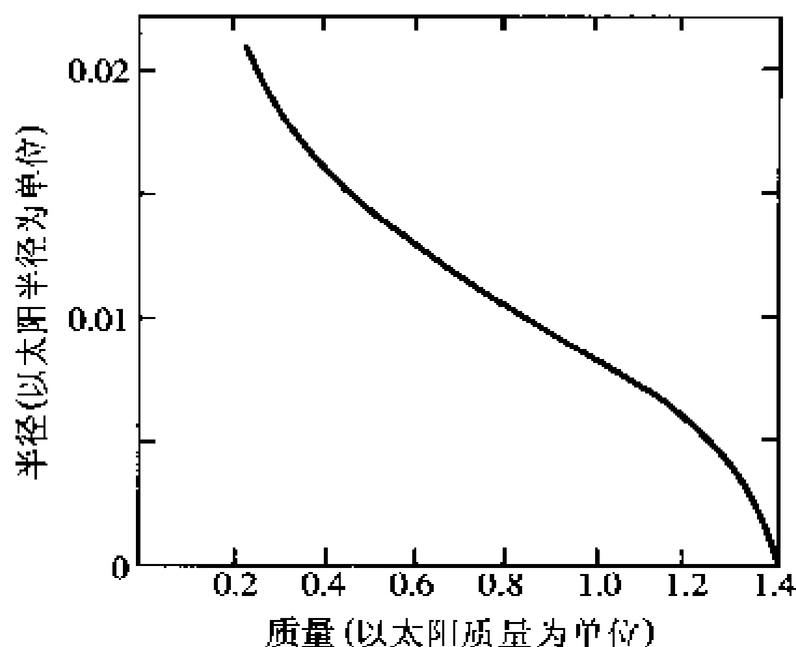


图14　白矮星的质量—半径关系

"泡利不相容原理",一定有非常多的简并电子处于更高的能级上,其速度接近光速而成为相对论性电子。相对论简并电子气的物态方程发生了变化,简并电子气压仍和温度无关,却与密度的4/3方成正比。这时,白矮星的质量—半径关系消失了。这就不可能通过白矮星半径的自动调节来达到平衡。因此,当坍缩后的恒星质量超过一定限度后,简并电子气就变为相对论性的,就不可能形成稳定的白矮星。白矮星如果获得物质使质量增加到一定的程度,也会变得不稳定,还要发生进一步的坍缩。钱德拉塞卡计算出稳定白矮星的质量上限为1.44个太阳质量。这是天文学上一项重要的成就,成为钱德拉塞卡获得诺贝尔物理学奖的原因之一。

白矮星质量上限之争

钱德拉塞卡的白矮星理论是全新的理论,特别是他提出白矮星的质量上限问题更是新颖。1934年,他完成两篇有关白矮星的论文,提交给英国皇家天文学会。1935年1月,学会召开学术会议,让他介绍研究成果。钱德拉塞卡阐述了相对论简并的概念,说明白矮星有一个质量上限。没想到,爱丁顿完全否定他的报告。爱丁顿说,根本不存在什么相对论简并性,白矮星的质量上限是计算错误导致的。会议主席不给钱德拉塞卡答辩的机会,反而要求他感谢爱丁顿的批评。同年7月,国际天文学联合会





在巴黎召开大会，钱德拉塞卡和爱丁顿又见面了。在会上，爱丁顿主动出击，又一次激烈批评钱德拉塞卡的白矮星理论。钱德拉塞卡仍然没有得到在会上申辩的机会。

爱丁顿是那个时代最著名的天文学家之一，赫赫有名的权威。他利用日全食的机会成功地验证了广义相对论关于星光经过太阳附近产生偏折的预言，这一观测成为具有划时代意义的科学实验。他的确对"恒星内部结构"理论作出了巨大的贡献，成为这一理论的奠基人。他深信，他已经证明恒星无论质量多大，都可以达到某种稳定的状态。他不理解钱德拉塞卡提出的白矮星质量上限的理论。他认为，普通恒星的质量可大可小，而白矮星这种老年恒星的质量为什么就不能超过钱德拉塞卡极限呢？这次爱丁顿在理论上是错了，他对物理学新原理的出现麻木不仁了；他自己不理解，还要压制新生事物，给钱德拉塞卡以巨大的压力。

虽然两次遭受学术权威的封杀，但钱德拉塞卡并不屈服，坚信自己的理论是正确的。他知道，他和爱丁顿争论的焦点不是天文学问题，而是要不要运用相对论、量子统计、泡利不相容原理等现代物理理论来解释像白矮星这样的致密星的内部结构问题。爱丁顿坚持经典物理学仍然适用，不承认相对论简并性。钱德拉塞卡转向物理学界去征求意见，争取支持。他首先得到了著名物理学家玻尔及在玻尔那里工作的罗森费尔德(Léon Rosenfeld)的支持。他们

认为，爱丁顿的理论违反了泡利原理，因而必然是错误的。钱德拉塞卡又向泡利请教，同样得到坚决的支持。渐渐地，他获得的支持越来越多，情况发生了变化。1939年8月，国际天文学联合会在巴黎召开学术会议专门讨论白矮星和超新星问题。钱德拉塞卡终于获得机会在大会上做报告，他公开指出爱丁顿理论的错误所在，赢得了许多人的支持。这场争论推动了天体物理学的发展。钱德拉塞卡和爱丁顿还从此建立了友好的关系，经常通信交流。爱丁顿逝世时，他出席追悼会，发表了感情真挚的悼词。他还出版一本题为《爱丁顿》的小册子，纪念爱丁顿百年诞辰。

很显然，任何一个新理论都需要时间来验证它的正确性。就拿对白矮星理论至关紧要的泡利不相容原理来说，它是1925年春天提出的，但直到泡利荣获1945年度诺贝尔物理学奖后，才被确认为自然界的基本定律。天文学的理论更需要用天文观测来检验。目前，已经发现白矮星逾千颗，它们的质量都不超过1.4倍太阳质量的钱德拉塞卡极限，没有一个例外。而且，它们的质量和半径关系完全遵从钱德拉塞卡推算出的理论曲线。

在1935年，无论是钱德拉塞卡本人还是其他科学家，都还不知道质量超过钱德拉塞卡极限的老年恒星的演化归宿是什么。现已公认，质量比较大的老年恒星不可能演变成白矮星，它们最终将演化为密度比白矮星更大的天体——中子星或者黑洞。





钱德拉塞卡把他的毕生精力贡献给天体物理学的研究。他对天体物理学的贡献是全面的，不仅在恒星内部结构理论方面，做出了像白矮星理论这样的开创性的成果，写出了《恒星结构研究导论》这部巨著，而且在恒星和行星大气的辐射转移理论、星系动力学、等离子体天体物理学、宇宙磁流体力学和相对论天体物理学等方面都有重要贡献。他的各阶段研究成果都总结成专著出版，前后达7部之多。从1989年到1991年，芝加哥大学出版社还专门为钱德拉塞卡出版了6卷本的《论文选》。

钱德拉塞卡在年轻的时候就闻名于世，一生获得许多荣誉和奖励。如英国皇家学会会员，美国国家科学院院士，剑桥大学亚当斯奖，太平洋天文学会布鲁斯奖章，英国皇家学会金质奖章、皇家奖章、科普利奖章，美国文理学院拉姆福德奖章，美国国家科学奖章，印度国家科学院斯尼瓦萨·罗摩奴阇奖章、巴布纪念奖等等。最令他欣慰的是，在他73岁高龄时荣获1983年度诺贝尔物理学奖。钱德拉塞卡教授于1995年8月21日去世，享年85岁。



宇宙磁流体力学

宇宙中的磁场和等离子体

瑞典天文学家阿尔文因对建立和发展太阳磁流体力学和宇宙磁流体力学的卓越贡献而荣获1970年诺贝尔物理学奖,这是对他近40年科学生涯的公正评价。

20世纪30年代末,为了解释太阳上多种多样的磁场变化过程,出现了一批磁流体力学的探索者,阿尔文是其中的先驱人物之一。他善于提出新概念、新思想,从天文现象中发现新的物理规律,更善于把自己发展的物理理论用于解释复杂的天文现象。他是宇宙磁流体力学这一新学科的奠基人。瑞典斯德哥尔摩皇家技术学院的几个系科直接起源于他的研究工作,特别是阿尔文实验室已成为举世闻名的磁流体力学研究中心之一。

阿尔文1908年5月30日出生于瑞典。他毕业于乌普萨拉大学,1934年获得博士学位。当阿尔文





还是一名博士研究生的时候,他就创立了一个关于宇宙辐射起源的理论,1937年,他在此基础上提出"银河系的星际空间到处存在磁场"的假设。在那时,人们并未观测到、也不认为银河系到处都有磁场。这一假设一直受到冷落。20世纪40年代,人们才发现银河系存在磁场的迹象;直至60年代测出银河系磁场的分布之后,才最后证实阿尔文的假设。

磁场在宇宙中是普遍存在的。地球、太阳、恒星、星系都有磁场,就连物质特别稀少的星际空间、星系际空间也有磁场。地球的磁场强度很弱,只有0.5高斯(5×10^{-5}特)。[①]太阳的平均磁场约为2高斯(2×10^{-4}特),太阳黑子区域的磁场却高达几百至几千高斯(几十分之一到几分之一特)。有些恒星磁场很强,可达几千乃至几万高斯(几分之一到几特),白矮星的磁场达到$10^5\sim10^7$高斯($10\sim10^3$特)。宇宙中磁场最强的要算中子星,达到了$10^8\sim10^{14}$高斯($10^4\sim10^{10}$特)。银河系星际空间的磁场仅仅有10^{-6}高斯(10^{-10}特)。

19世纪末,物理学家塞曼(Pieter Zeeman)发现在均匀磁场中,原子辐射产生的某一条发射谱线会分裂为两条或三条,分裂程度与磁场强弱有关。天文

---

① 国际天文学界普遍采用"高斯"作为衡量天体磁场强度的单位。"高斯"与我国现行法定计量单位"特[斯拉]"的换算关系为:1高斯 = 10^{-4}特。



阿尔文

学家利用塞曼效应设计出观测太阳和恒星磁场的设备，开辟了太阳物理学和恒星物理学的新领域。

太阳是惟一的一颗能给出表面磁场分布的恒星。太阳磁场望远镜不仅能测出日面上的磁场分布，还能给出光球大气中的速度场，为分析太阳等离子体与磁场之间的相互作用提供了数据。黑子是太阳磁场最强的区域，一个大黑子的磁场强度可超过4000高斯(0.4特)。太阳磁场起源于太阳光球之下的对流层，但磁场的观测资料主要来自光球。在对流层，物质受到的磁压相对较小，那里的磁场不起主要作用。在光球层，磁压和其他力的大小相当。在光球之上的色球层和日冕中，磁压相对较强，变为起主导作用(图15)。

阿尔文在提出银河系中处处有磁场的假设不久，又提出星际空间充满着等离子体。对带电粒子的运动来说，有没有磁场存在情况是很不一样的。中性粒子和带电粒子在磁场中运动对磁场的影响也是不一样的。因此，弄清楚宇宙中物质所处的状态十分重要。物质有固体、液体、气体和等离子体四种状态。前三种状态大家都很熟悉，随着温度的上升，





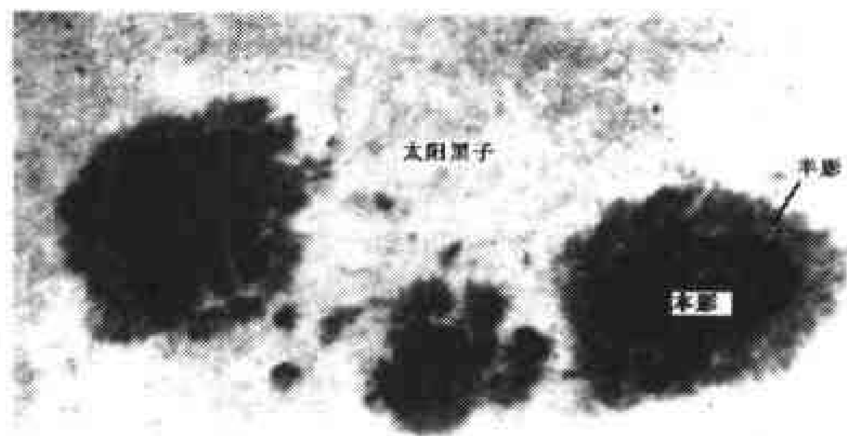


图 15　太阳黑子照片

物质会从固态变为液态，从液态变为气态。在温度非常高的情况下，物质变为等离子体状态。当气体温度增加到几千上万度，或者受到强烈的紫外线、X 射线、γ 射线的照射时，原子核外的电子因获得足够的能量，摆脱原子核的束缚而成为自由电子。这种核外电子变为自由电子的过程称为电离。此时，物质由正离子、电子及未经电离的中性粒子所组成。这种状态就是物质的第四态——等离子体。因正负电荷密度几乎相等，故从整体看等离子体呈现电中性。

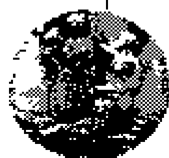
天体物理学和空间物理学的研究对象，都涉及等离子体。恒星表面的温度在 5000～10 000K 之间，在这个温度范围内物质只能部分电离。但是到了恒星内部，越向里去，温度越高，电离程度也越来越高；在恒星核心区，物质 100% 地被电离。恒星附近的星际介质因受恒星的辐射或高速星风的作用而被电离。宇宙中绝大部分的物质均呈等离子体状态。实

际上，在天文学研究中，几乎完全要靠等离子体的辐射来获取知识。

等离子体在磁场中的运动

既然等离子体和磁场在宇宙中都是普遍存在的，研究天体上发生的物理过程就必须考虑等离子体和磁场的存在，并要研究它们之间是如何相互作用的。等离子体是流体，要遵从流体力学的规律；它在磁场中运动，又要遵从电动力学的规律。只用流体力学或电动力学，都不能解决等离子体在磁场中运动的问题。于是磁流体力学便应运而生，阿尔文则是这门新兴学科的奠基人。

等离子体在磁场中是怎样运动的呢？很显然，等离子体在磁场中运动会受到洛伦兹力的作用，其运动方式和无磁场时的情况不同。当一个带电粒子进入磁场时的运动方向与磁力线垂直，洛伦兹力只改变粒子的运动方向，使它们作匀速圆周运动；当带电粒子的运动方向不与磁力线垂直时，其速度可分解为一个与磁场垂直的分量和一个与磁场平行的分量。带电粒子沿磁场方向运动不受洛伦兹力，故粒子速度的水平分量保持不变，因此在磁场中沿螺旋轨道运动。螺旋的轴线称之为引导中心。螺旋轨道的半径与带电粒子的质量成正比（图16）；正离子比电子的质量大得多，因此正离子的回旋半径大，距磁力线较远。而电子则以很小的回旋





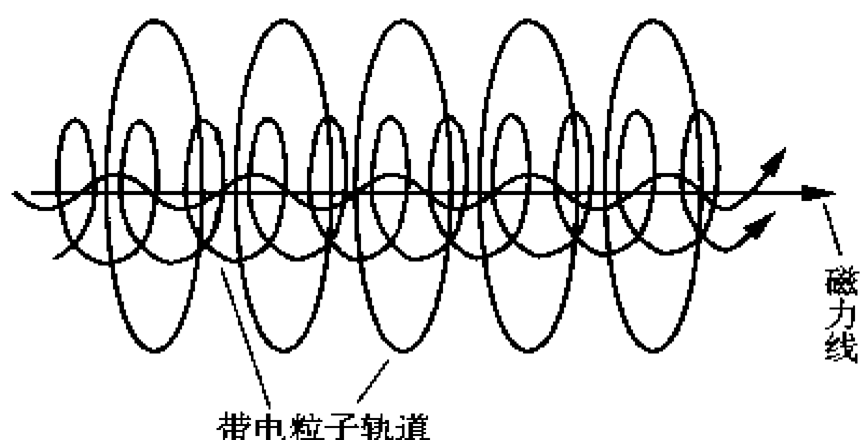


图 16　带电粒子在磁场中绕磁力线沿螺旋轨道运动，螺旋轨道的半径与带电粒子的质量成正比

半径绕磁力线前进。

阿尔文把带电粒子在磁场中围绕"引导中心"运动的方式发展为一种工具，成为等离子体物理研究的重要方法。他应用这种近似方法研究地球磁场和极光现象，得出地磁场中存在环流的新结果。这与当时流行的看法不一，因而未能得到同行的认可，但后来的研究却表明阿尔文提出的环流确是地磁球壳结构的一个重要特征。

宇宙中既有磁场又有等离子体，磁场的变化就具有新的特点。阿尔文发现等离子体在磁场中运动的一个新现象，那就是磁冻结。从物理实验中可以知道，当电流流过由导线组成的螺线管后会产生磁场。在断开电源后，磁场很快就会消逝。如果在螺线管中放着电导率很高的物质，磁场衰减就很慢。这种现象称为磁扩散。磁扩散的快慢与介质的电导率及电流流动区域的尺度密切有关。一个半径 1 米的铜球的磁场衰减时间是 10 秒。太阳黑子磁场衰

减时间是300年，这个时间比黑子本身的寿命要长得多。太阳普遍磁场通过扩散消逝的时间是10^{10}年，银河系磁场的衰减时间更长。因此，太阳和恒星磁场以及更大尺度的星系磁场扩散很小，其位形与形成时的情况没有多大差别。

在磁扩散几乎为零的情况下，磁冻结的现象发生了。这时，等离子体在磁场中运动必然带着磁力线一起运动，相当于磁力线冻结在物质里面了，或者说等离子体粘连在磁力线上了。由于磁冻结而引起的磁场变化过程称为对流过程。对流过程的时间尺度与等离子体流动的速度及相关的电流流动区域的几何尺度有关。几何尺度越大，等离子体速度越小，对流的特征时间就越短。磁扩散过程总是使磁场衰减，但磁场的对流过程既可以使磁场衰减，也可能使磁场增强。

由磁扩散的特征时间与磁对流的特征时间之比$t_{扩散}/t_{对流}$定义的磁雷诺数，是一个重要的参数。是表明磁扩散过程与对流过程哪个更为重要的参数。磁雷诺数远远大于1时，磁扩散过程的特征时间比磁对流过程特征时间长得多，磁对流过程起主要作用，这时的磁场是和等离子体冻结在一起的。天体物理学的许多研究对象，例如太阳黑子、太阳及银河系等，几何尺度非常大，总能满足磁雷诺数比1大得多的条件。因此，天体物理学研究中的等离子体基本上是和磁场冻结在一起的。





太阳和宇宙磁流体力学

阿尔文建立和发展磁流体力学，是和他从事太阳活动区物理的研究分不开的。到20世纪40年代中叶，磁流体力学的基本理论体系大致构成。其中，阿尔文提出的一种磁流体力学波成为这门学科成熟的标志性事件。这种波被人们称为阿尔文波。从那时以后，磁流体力学的基本原理发挥了巨大的理论威力，成功地解释了太阳上的一个又一个观测现象，成为探索太阳物理规律的支柱理论之一，形成了新的"太阳磁流体力学"研究方向。磁流体力学在其他天体中的应用，便形成了宇宙磁流体力学，成为理论天体物理学的一个分支。

1942年，阿尔文在分析研究太阳黑子磁场过程中发现了磁流体力学波。在磁雷诺数比1大很多的情况下，等离子体和磁场冻结在一起，这时磁力线存在着张力。普通力学原理和实际经验告诉我们，弹拨乐器的弦线，在外力的作用下，就会发生振动，产生沿弦线方向的横波传播。粘附着等离子体的磁力线也像一根弦线一样，当在垂直磁力线方向上受到扰动后，也会产生一种横波，也就是阿尔文波。从流体力学理论可以知道，一般的理想流体中是没有横波的。因此，当时几乎所有的物理学家都不相信阿尔文波的存在。直到1948年，他到芝加哥大学作学术报告，再一次谈他的磁流体力学波，终于说服了物

理学界的权威学者费米，这之后才为世人所承认。

当然，最重要的还是1949年所进行的实验。根据阿尔文的推导，阿尔文波的速度与频率及振幅无关，仅是磁场强度和密度的函数。磁场越强，密度越小，波的速度越大。他在实验室里用水银做实验，磁场是1000高斯(0.1特)，结果得到了速度约为75厘米/秒的阿尔文波。1959年他又在等离子体中做实验，又一次得到证实。

在磁流体力学中，声波受磁场的影响分解为快磁声波和慢磁声波两种，快磁声波的相速比阿尔文波速快，而慢磁声波的相速则比阿尔文波速慢。这三种波统称磁流体力学波。

随着对太阳观测的逐步深入，揭示了大量的太阳活动现象，用当时公认的理论知识很难加以解释。例如：观测发现太阳黑子的温度偏低，但磁场却非常强；黑子群倾向于成对地出现；太阳黑子变化以11年为周期；色球和日冕气体比光球的温度还要高；太阳耀斑爆发释放出能量巨大的辐射和高能粒子等等。

早在1942年，阿尔文就用阿尔文波来解释太阳黑子的形成和它们的11年周期性变化，并由此逐渐发展成为系统的太阳黑子理论。美国太阳物理学家帕克(Eugene Newman Parker)认为，太阳黑子中的对流过程可以激发出阿尔文波，由于阿尔文波沿磁场传播把能量带走，导致黑子内部温度下降，从而解释了黑子温度较低的观测事实。





磁流体力学湍流与宇宙中磁场的产生和维持密切相关,在20世纪60年代中叶,湍流发电机理论开始应用到解释太阳磁场的变化。湍流是等离子体的无规则运动,会拉伸磁力线而使磁场增强。湍流发电机主要解决小尺度磁场的建立和维持,而小尺度磁场的涨落会对大尺度磁场作出贡献。

1948年阿尔文出版了专著《宇宙动力学》,1963年又出版《宇宙电动力学》,总结了磁流体力学的基本原理及其在天体物理学中的应用。此后他继续深入研究这一领域的各种问题,后于1995年4月2日逝世。

太阳系和宇宙演化

太阳系的起源和演化问题受到科学家乃至普通公众的关注是很自然的。迄今人们已先后提出过几十种太阳系起源学说。它们主要有两类,一类认为太阳系是由同一块星云物质凝聚而成的,另一类则认为太阳系是在一次突然的灾变中产生的——如两颗或三颗恒星碰撞的结果等。在20世纪前期的研究中,星云说占上风。1942年以后,阿尔文发表了一系列论文阐明他的太阳系演化学说,并在1954年和1976年出版专著《论太阳系的起源》和《太阳系的演化》。阿尔文的太阳系起源学说属于影响较大、比较成熟的一种。

阿尔文学说的要点是:太阳及其行星系统都是

由高度电离的气体云形成的。高度电离的星云具有磁场,星云的中心部分形成太阳,并具有比星云本身强得多的磁场。由于星际磁场和电离气体云自身磁场的作用,电离气体云维持在太阳附近约0.1光年的范围内。后来由于冷却电离气体慢慢地还原为中性气体,中性原子不再受磁场约束,在太阳引力作用下不断地向太阳下落。中性的星云气体在下落过程中,引力势能转变为动能,温度逐步升高而再度电离。星云中有不同的元素,每种元素的电离电势不同,电离电势低的元素先被电离,形成电离气体云。电离气体云由于受磁场的约束而停止落向太阳,电离电势比较高的元素将在离太阳比较近的地方电离。最后,由4种不同元素组成的气体云在离太阳不同的距离上停留下来,形成4个电离气体云。太阳系中的9颗大行星及其卫星都是由这4个电离气体云中的物质凝聚而成的。行星系统的卫星形成过程与行星形成的过程类似。

阿尔文的学说强调了形成太阳系行星系统中的电磁作用。这一学说还可以很好地解释太阳系角动量的分布问题。太阳形成后具有比较强的偶极磁场,可以一直延伸到太阳附近的4块电离云中。太阳在自转,磁力线自然也跟着一起转动。电离云中的电离物质不能跨过磁力线,于是也跟着磁力线一起运动。太阳自转把附近的4块电离云带着一起转动,电离云由此获得角动量。在这个过程中,太阳通过“磁耦合机制”把角动量转移给电离云物质,太阳





本身的自转速度逐步减慢。阿尔文的模型定量地解释了太阳系中的角动量分布。

对于宇宙的形成和演化，阿尔文提出与流行的大爆炸宇宙学说不同的等离子体宇宙演化学说。1961年，阿尔文和克莱因（Oscar Benjamine Klein）首次提出等离子体宇宙模型。他们相信现在的宇宙正处在膨胀之中，但不像大爆炸宇宙论预期的那么激烈。而且，宇宙也不像大爆炸宇宙论认为的那样始于一个极高温、极高密状态的火球。阿尔文认为，现在的宇宙经历了一个先收缩后膨胀的漫长过程。最初的宇宙是一个直径约为10^{12}光年的巨大球体，在该球体内充满着分布均匀而密度极其稀薄的粒子和反粒子。其密度稀薄到每100立方米的容积内只有一个粒子或一个反粒子。粒子之间彼此离得很远，基本上不可能发生碰撞。在引力起作用后，巨大的球体开始收缩，球的半径逐步缩小，粒子与反粒子越靠越近。正、反粒子碰撞发生湮灭，释放出能量。当正、反粒子湮灭所释放的能量足以抵抗引力的作用时，巨大球体就停止收缩而转为膨胀。膨胀开始时是急剧的，但逐渐慢了下来（图17）。

在阿尔文他们提出等离子体宇宙学的时候，反粒子的概念和实验还处于早期阶段。这个模型自然存在不少不足之处。天文观测表明宇宙中物质的成群、成团性比以前估计的还要突出，这是他们的模型无法解释的。为此，阿尔文进一步把在磁流体力学实验中发现的“等离子体细束”应用到他们的宇宙模

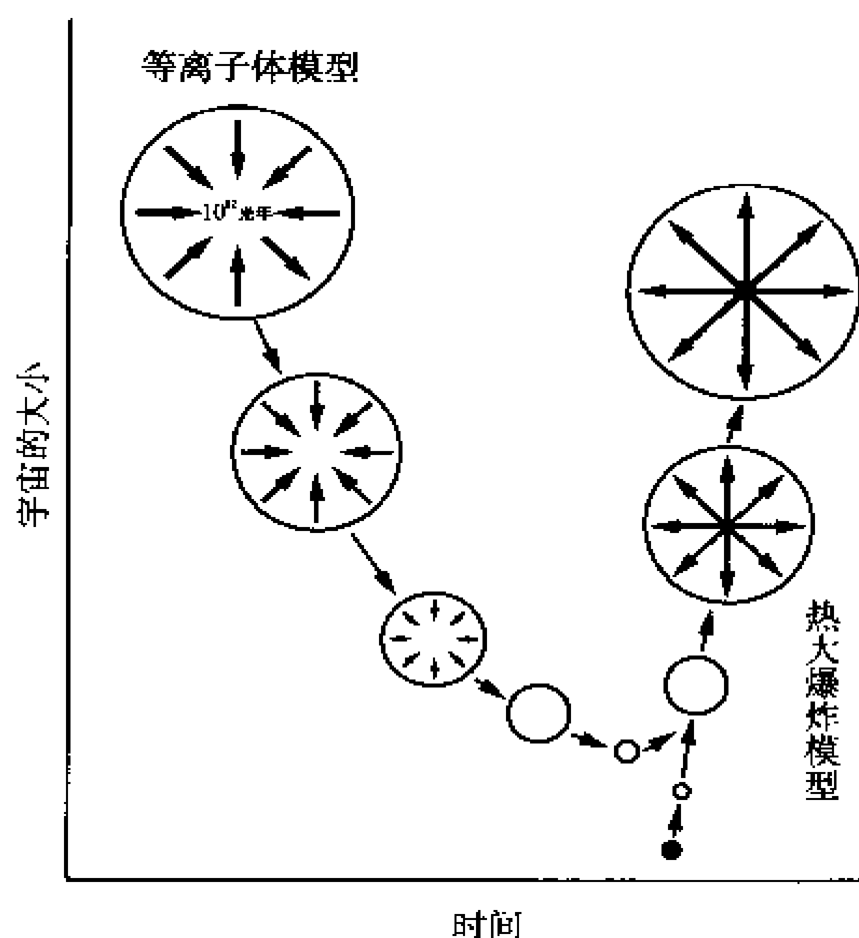


图 17 阿尔文和克莱因等离子体宇宙模型。最初的宇宙是一个直径约为 10^{12}光年的巨大球体，经历了先收缩后膨胀的过程

型中。

在研究磁场对等离子体的影响时，阿尔文发现等离子体能够携带电流。这个电流和其他电流一样，也在其周围产生磁场，导致等离子体、电流和磁场缠绕在一起，使电流沿磁力线流动。阿尔文形象地称之为“等离子体细束”，也有人称之为“等离子体索”。在实验室的极光和磁暴现象模拟实验中曾经观察到这种现象。在天文观测中，日珥中长达几十万千米的暗条和银河系中心发出的长达 120 光年的





纤维状物质都是"等离子体细束"。阿尔文相信这种"等离子体细束"会不断生长，达到几十万、几百万光年长。最后"等离子体细束"断裂为超星系团尺度的等离子体云。这些云中的"等离子体细束"又断裂为星系大小的团块，最终形成星系和星系团。由等离子体细束形成的星系保留了等离子体的高速运动，因而导致星系具有比较大的本动。

在阿尔文工作的基础上，等离子体物理学家勒纳(E.Lerner)、彼得斯(W.Peters)和美国洛斯阿拉莫斯实验室的佩拉特(A.Peratt)等人，在宇宙微波背景辐射、轻元素的生成及星系的形成和演化等方面发展了阿尔文的宇宙演化模型。

当然，物质与反物质的分布和隔离问题仍是阿尔文模型的困难之一。1932年，安德森(Carl David Anderson)发现正电子，证明了反粒子的存在。理论和实验均表明，一个能量超过两倍电子静止质量的γ光子可以转化为一个电子和一个正电子。1996年，欧洲核子研究中心的低能反质子环产生出了反质子和反氢原子，证明了反物质的真实存在且可在实验室中生成。但是关于宇宙中的粒子和反粒子，特别是如何寻找宇宙中的反粒子，至今仍是尚未解决的科学问题。阿尔文宇宙模型是否能最后成功，也有待物理学和天文学实践的进一步检验。

8

宇宙化学元素合成

丰富多彩的物质世界

我们今天的物质世界之所以丰富多彩，是因为有多种多样的元素存在。宇宙中的万物都由元素周期表中列出的各种元素组成。不同的元素仅仅是它们原子核中的质子数不同。具有相同质子数，但中子数不同的原子核称为同位素。地球、行星、太阳、恒星、星云以及星际介质中有着各种各样的元素及同位素。这些元素是在宇宙演化的不同阶段和不同的恒星演化过程中产生的。弄清宇宙中各种元素的生成机制以及如何形成目前观测到的丰度，一直是科学家探求的一个热点课题。

美国核物理学家福勒从事有关元素合成的核反应实验和理论研究，被誉为这一领域的先驱者。他把原子核物理理论应用于天体物理学，成为核天体物理学这个新学科的奠基人，自然也就成了著名的天体物理学家。他因研究宇宙化学元素形成机制取





得重大成果,而获得1983年度的诺贝尔物理学奖。

福勒1911年8月9日出生于美国宾夕法尼亚州的匹兹堡。1933年毕业于俄亥俄州立大学工程物理系。1936年在加州理工学院获哲学博士学位,此后一直在加州理工学院工作。1995年3月14日,福勒在加利福尼亚州帕萨迪纳逝世,享年83岁。

20世纪20年代,天文学家通过光谱分析知道了太阳物质的化学组成。到40年代,人们已经大体知道多数恒星的化学组成和太阳很相似。太阳上的元素相对于氢的丰度如下:氢(H)为1.0,氦(He)为0.38,氧(O)为0.001,碳(C)为0.00052,氮(N)为0.0001,硅(Si)为0.000028,镁(Mg)为0.000023,铁(Fe)为0.000003,钠(Na)为0.000002,钙(Ca)为0.0000014,镍(Ni)为0.00000083,铬(Cr)为0.00000023等。天文学上习惯把氢和氦以外的元素都称为重元素。虽然多数恒星的元素丰度都差不多,但也观测到某些种类的恒星的元素丰度差别比较大。如有的恒星碳丰度特别大,有的恒星锆和锝特别多,有的恒星锰、铬、磷、硅的含量更丰富等等。

我们知道,地球上的化学元素种类繁多,其他天体上有的地球上都有。人体中也有丰富的元素,不仅有铁、碳、氮、钙、锂、铍、硼、氢,还有微量的比铁更重的元素。

宇宙中最多的元素是氢,其原子核就是质子。按质量计,氢约占宇宙中全部可见物质的3/4;次多的是氦,约占1/4。所有其他元素的质量总和只占



福勒

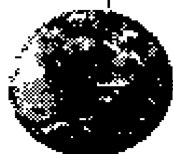
不足百分之一。但是，其他元素种类繁多。这些元素及其丰度是怎样形成的？这个问题一直困扰着物理学家和天文学家。

大爆炸宇宙模型给出部分的回答。在宇宙的极早期，也就是宇宙诞生最初的仅 10^{-36} 秒产生了物质世界各种各样的粒子：光子、电子、中微子、质子、中子等。在最初的 3 分钟后，温度降到 10^9K 时宇宙进入核合成时代，足以把宇宙中大约1/3的氢转变为氦，还能合成少量的锂和硼。由于宇宙冷却得太快，在大爆炸之后约 15 分钟，核聚变反应就停止了。因此，在宇宙诞生的初期不可能形成比较重的原子核。那么宇宙中的重元素又是怎样产生的呢？

福勒从实验和理论两个方面对恒星中的元素形成问题进行长期的研究，终于找到比较完满的答案，而为世人所认同。

太阳能源和热核反应

太阳是一个巨大的火球，它不断地以光和热沐浴着地球。太阳的表面温度大约为 6000K，而中心温度却高达 1.2×10^7K。它每秒钟向太空辐射的能





量为 3.8×10^{26}焦。太阳的年龄已达 50 亿年。根据地质资料推断,在这么长的时间内太阳的辐射能没有明显的变化。这表明它必定有一个长期而稳定的能源。

早在 19 世纪,物理学家已认识到太阳辐射的能量不可能由通常的化学燃烧提供。1926 年,英国天文学家爱丁顿认为恒星的能源只能来自核反应。但当时的物理学家却认为,只有当温度达到几百亿开时,才能发生核聚变,而恒星中心区域的温度达不到这样的高温。所以,他们认为在恒星内部不可能发生核反应。最后,还是爱丁顿胜利了。物理学家终于发现,由于量子力学的隧道效应,在恒星内部的温度条件下是可以发生核反应的。

人类认识原子核的复杂结构和核反应,是从 19 世纪末发现天然放射性开始的。当时发现了放射性元素铀、钋和镭放出 α,β,γ 三种射线,其中 α 射线是氦的原子核,β 射线是电子,γ 射线是能量很高的光子。从 1911 年开始,物理学家就开始进行原子核的人工转变实验。在发现质子和中子后,物理学家才最后弄清楚原子核是由质子和中子组成的。原子核用符号$^{A}_{Z}X$表示,其中 X 为该原子核所对应的元素符号,A 为质量数,代表所含中子和质子的总数,Z 为质子数。α 粒子用$^{4}_{2}He$表示。

原子核依靠强大的核力把众多的质子和中子紧紧地聚集在一起。核力的作用范围非常小,作用距离只有 10^{-13}厘米。原子核是带正电的,同性电荷

相斥，原子核（或质子）之间的静电斥力和它们的电量成正比，和它们之间距离的平方成反比。原子核越接近，斥力越大。原子核中的质子越多，斥力也越大。要使几个带正电的原子核或质子发生聚变，必须使它们彼此接近到核力能起作用的范围 10^{-13} 厘米以内。

带电粒子在电场和磁场中受电场力和洛伦兹力的作用可以获得加速度。在地球实验室中，科学家利用这一原理，研制成各种各样的高能带电粒子加速器。最初的加速器可以把质子加速到具有 700 千电子伏的能量，目前世界上的大型加速器可以把质子加速到 1 万亿电子伏。加速器使带电粒子获得很高的能量，成为轰击原子核的"炮弹"，帮助实现了人工原子核反应。

在太阳和恒星内部没有类似的加速器，发生核聚变反应只能靠高温。在高温情况下，原子电离为原子核和电子，同时使部分原子核具有很高的动能，使它们能克服库仑斥力达到可以发生聚变的程度。因此这种反应又称"热核反应"。在地球上已成功地实现氢聚变的热核反应，那就是氢弹爆炸。实现氢聚变所需的极端高温是由引爆氢弹内部的一枚原子弹提供的。

在太阳或其他质量和太阳相仿的恒星所具有的温度下，只能有氢聚变为氦的反应。当氢元素燃烧完后，太阳将会先变为红巨星，最后变成白矮星及行星状星云。由于原子核之间的静电斥力正比于两个





核所带电荷之乘积，因此不同的核反应必须在不同的温度下才能进行。要使氢同碳、氮、氧等较重的原子核发生反应，需要 1.5×10^7K 以上的高温。至于更重的原子核之间的反应，需要的温度当然就更高了(图 18)。

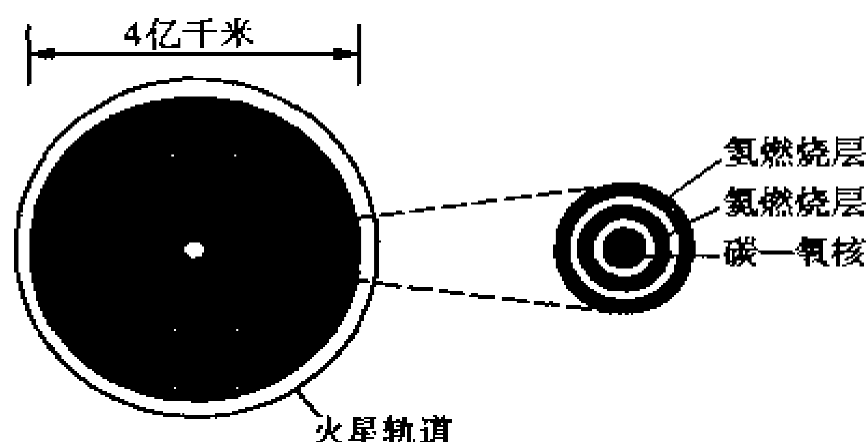


图 18　小质量恒星的结构。它们演化的晚期将变为红巨星，其半径接近火星的轨道半径，氢燃烧层的半径和地球相当

质子—质子反应

太阳上的氢核聚变，并不能由 4 个质子和 2 个电子直接形成氦核。因为，要让 6 个粒子同时碰撞的机会实在是太小了。

氢聚变是由质子—质子反应过程完成的。这个反应分三个步骤：第一步是两个质子碰撞并发生聚变，形成氢的同位素氘$^2_1$H；第二步是由氘和质子碰撞形成氦的同位素氦 3($^3_2$He)；最后一步是由 2 个氦 3($^3_2$He)碰撞形成氦核($^4_2$He)，最终完成由氢核聚

变为氦核的反应。这三个核反应都是放热反应。这一连串的反应过程，共有6个质子参与，最后形成1个氦核、2个质子、2个中微子、2个正电子和2个光子。同时释放24.158电子伏的能量。

福勒在研究生学习阶段，就和查尔斯·劳里森(Charles Christian Lauritsen)合作，进行质子和氘核反应的实验研究，这是质子—质子核反应中的第二步。他们把超高压X射线发生器改造成阳离子发生器，用这台设备进行核反应实验。为了揭示太阳和恒星上的核反应过程，首先要在地球实验室中进行人工核反应实验，然后才能外推到太阳或恒星上去。他们的研究结果表明，当恒星质量不超过1.2倍太阳质量时，只能进行质子—质子反应，成为这类较小质量恒星"氢燃烧"的惟一方式。由于太阳上发生的质子—质子反应要放出中微子，所以福勒一直关注着太阳中微子流的探测。他们的研究指出，用氯的同位素$^{37}_{18}Cl$放射化学中微子探测器有可能探测到太阳中微子流。

氢聚变为氦的质子—质子反应，只需要六七百万开的温度就可以"点火"。但是，这个反应只有在一千多万开的高温下才能有效地进行。太阳内部的温度是由中心向外逐渐降低的，因此，只有在中心附近一个不大的区域里质子—质子反应才能进行。进行着核反应的这个中心区域称为"产能核心"。太阳产能核心的半径约为太阳半径的15%，即约10万千米，产能核心每秒钟通过质子—质子反应产生约





4×10^{26}焦的能量，正好和目前观测到的太阳辐射相当。

碳—氮—氧循环

1938年，美国核物理学家贝特发表了有关氢通过碳—氮—氧循环而聚变的论文。这篇论文给加州理工学院凯洛格实验室的核物理学家以极大的刺激，因为他们一直在从事这一课题的研究。年轻的福勒从1933年起就在这里研究碳—氮—氧循环中的第一个反应，进行碳核捕获一个氢核形成氮同位素核氮7的实验，还测量了碳核和氮核受质子轰击的作用截面。他们的实验研究定量地给出核反应中释放的能量，提供了检验碳—氮—氧循环可行性的实验依据。

在碳—氮—氧循环中，首先由碳核$^{12}_{6}C$和一个氢核（质子）碰撞，质子打入碳核使之变为氮同位素核$^{13}_{7}N$；它是放射性核，很快就放出两个轻粒子（正电子和中微子），形成碳的同位素核$^{13}_{6}C$，由$^{13}_{6}C$和质子反应形成氮核$^{14}_{7}N$；新的氮核和质子相碰撞形成氧同位素核$^{15}_{8}O$，$^{15}_{8}O$也是放射性核，它放出一个正电子和一个中微子后衰变为氮同位素核$^{15}_{7}N$；最后，由$^{15}_{7}N$和一个质子碰撞形成碳核$^{12}_{6}C$和氦核（$^{4}_{2}He$）。这一系列反应都是放热反应，因此，只要有足够多的氢核（质子），就可以成为稳定的能源。碳—氮—氧循环的结

果是4个氢原子核合成1个氦原子核，同时产生2个正电子、2个中微子和3个光子，释放出25.03兆电子伏特的能量。参与反应的碳元素在核反应前后没有发生任何变化，而氮、氧同位素只是在中间过程中产生又消失。只有在1500万开以上的高温条件下，碳—氮—氧循环核反应才能有效地进行。因此，只有在比太阳质量大很多的恒星上，这种核反应才成为提供能源的主要途径，实现由氢到氦的聚变。

福勒深知这类研究的重要意义，尽全力改善这项研究的条件。为此，他和合作者托马斯·劳里森(Thomas Lauritsen)一起设计了高压壳内的范德格拉夫加速器。只是由于第二次世界大战爆发，新研制的加速器刚开始运行就被迫中断。大战结束后，福勒和他的同事又回到核物理领域，继续研究原子核天体物理。他们重点研究的仍然是碳—氮—氧循环核反应，并侧重考察在恒星内部温度较低的情况下发生这一核反应的可能性。

从1946年开始，这个实验室把研究太阳和恒星上的核物理过程作为新的研究方向，福勒成为这项研究的学术带头人。贝特提出碳—氮—氧循环已经10年，但这一问题仍然面临重大困难，因为在太阳或恒星上要发生碳—氮—氧循环过程必须要有足够的碳元素存在，而贝特从来没有给出恒星中产生碳元素的机制。英国天文学家霍伊尔(Fred Hoyle)一直努力寻求在恒星内合成重元素的途径，遇到的困难也是不能获得足够的碳($^{12}_{6}C$)。他实在没有办法，





就假定$^{12}_{6}C$以某种激发态形式存在，这样少量的碳元素就够了。很幸运，加州理工学院的物理学家们的实验证实了这个假定。他们用氘和氮($^{14}_{7}N$)核碰撞，生成激发态的碳($^{12}_{6}C$)和一个氦核。碳是有了，但氦元素从何而来，却仍不知道。

福勒等出色地解决了这个问题。他们的实验是由硼的同位素($^{12}_{5}B$)衰变制造出$^{12}_{6}C$的激发态。结果发现有一些激发态的碳回落到基态，另一些则分裂为3个氦核。这一核反应是可逆的，说明3个氦核也可以结合成碳核。这和氢聚变为氦核的"氢燃烧"一样，3个氦核聚变为碳核也会释放出大量的能量。"氦燃烧"可以成为某些恒星在氢燃烧后的核能源，同时为氢聚变的碳一氮一氧循环提供必需的碳。

热核反应理论解决了长期以来存在的太阳和恒星能源之谜，解决了氦、碳等元素的合成难题，开辟了核天体物理学的新领域。它成为恒星内部结构和恒星演化学的理论基础，因而无疑是天体物理学乃至整个物理学的一项重大成就。

B^2FH理论

1954～1955年，福勒是在英国剑桥大学度过的。此次赴英是为了和伯比奇夫妇(Geoffrey Burbidge 和 Margaret Burbidge)及霍伊尔合作。他们以1956年发表的元素丰度曲线为标准，研究恒星中元素形成的理论。他们于1956年在《现代物理评论》期刊上发

表题为“恒星中元素的合成”的论文，全面阐述了在恒星内部发生的核反应中生成重元素的理论（图19）。作者按姓氏字母顺序排列：伯比奇、伯比奇、福勒和霍伊尔。因此，人们常按首字母而将他们的理论称为 B^2FH 元素形成理论。

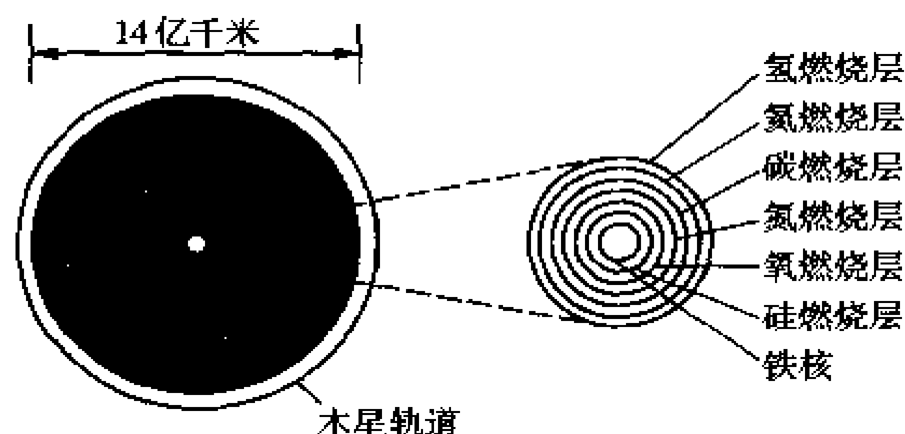


图 19　大质量恒星的结构。它们演化的晚期将变为红巨星，其半径接近木星的轨道半径。恒星的能量来自中心的 6 个燃烧层，氢燃烧层的半径和地球相当

福勒虽是这篇论文的第三作者，但他却是核心人物。在论文发表的前几年中，福勒和霍伊尔合作已成功地解决了恒星中碳元素的形成问题。它是恒星中元素合成理论的关键。以此为例，其他重元素在恒星中合成的问题就很容易解决。如用氦核（α粒子）轰击原子核，每次可使核的质量增加 4 个原子质量单位，而新形成的核又可以衰变为其他元素和同位素。对于比铁更重的元素，单个中子打进原子核的反应也很重要，每次可以使核增加一个质量单位。各种元素合成的核反应过程是否能实现，取决于它们的反应速率和反应截面，以及反应所要求的





温度和压强条件。这些都要在实验室中一一进行实验和测量。这些实验和计算非常繁杂，工作量很大。但是，和解决碳元素合成的难题相比还是容易得多。福勒和他的小组成功地计算了生成恒星中所有元素及其同位素的将近100个核反应的反应速率，为建立B^2FH理论做好了充分准备。福勒和凯洛格实验室的合作者对恒星核合成理论的形成起了关键作用。

B^2FH的论文受到极高的评价，被视为科学经典论文。可以说，这篇论文解决了在恒星中产生各种天然元素的难题。这一理论提出相应于恒星不同演化阶段的8种核反应过程，可以形成所有的元素及其同位素。这些元素合成后，可能由恒星抛射到宇宙空间，造成了我们观测到的元素丰度分布。B^2FH理论提出的8种过程是：4个氢核聚变为氦核的过程；氦核聚变为碳核和氧核等的过程；α粒子与氖同位素反应相继生成镁、硅、硫、氩等的过程；产生铁峰元素（钒、铬、锰、铁、钴、镍等）的过程；慢中子和快中子俘获过程，合成比铁峰元素更重的元素；质子俘获过程，以合成一些低丰度的富质子同位素；以及生成氘、锂、铍、硼等低丰度轻元素的X过程。

应该指出，并不是所有恒星都能产生比氦重的元素。由于合成重元素要求特别高的温度和压强，所以只有少数大质量恒星能够产生合成重元素的核反应。而比铁更重的元素，则是在超新星爆发的短暂瞬间内产生的。随着超新星爆炸，众多的重元素

便撒入宇宙空间。我们地球上现存的所有比铁重的元素，包括我们人体中的微量重元素，都是50亿年以前超新星爆发的遗留物。除了宇宙大爆炸后形成的第一批恒星外，其他恒星中也都会有超新星爆发的遗留物(图20)。

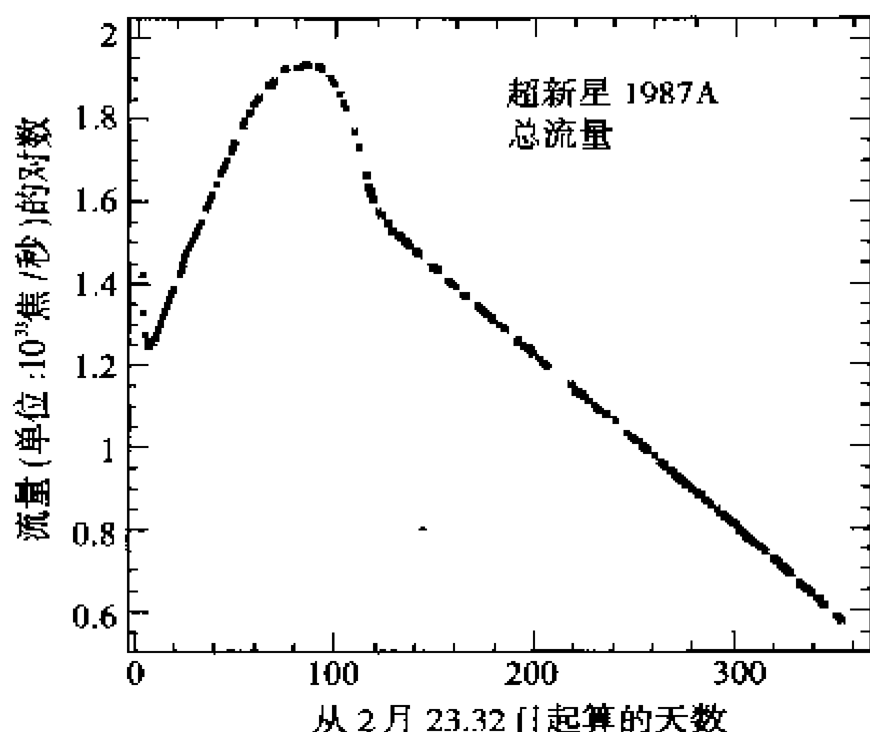


图20　超新星1987A的光变曲线。比铁更重的元素就是在超新星爆发瞬间产生的

鉴于超新星爆发和大爆炸宇宙模型对元素合成的重要作用，1960年以后福勒转向研究超新星爆发和大爆炸宇宙论。1960年，他和霍伊尔合作发表关于两类超新星爆发机制的论文，认为Ⅰ型超新星是低质量简并星的热核爆炸，而Ⅱ型超新星爆发则是由于恒星内部铁心的瓦解。同年还发表了如何确定化学元素生成年代的论文，给出宇宙演化年表。





1967年，他和霍伊尔合作发表把大爆炸宇宙元素合成和恒星元素合成结合起来的综合理论，对氦、氘、氦3和锂等元素的合成给出进一步的结果，并再次确认大爆炸对产生比氦更重的元素不会有什么贡献。

9

诺贝尔奖离我们有多远

本书介绍了迄今获得诺贝尔物理学奖的全部天文学项目，获奖者共 9 人。他们包括美国 6 人(其中包括美籍德国人和美籍印度人各 1 名)，英国 2 人，瑞典 1 人。中国是文明古国，曾有发明指南针、纸、火药和印刷术的光辉历史。可是，中国的天文学家什么时候才能荣获诺贝尔物理学奖呢?

只有那些有深度和广度，能开辟一个新的领域的划时代的成果才能获得诺贝尔奖。很显然，要想取得这样的成果，必须选择别人没有做过的创新性的课题。

我国基础科学研究底子本来就很薄，天文观测设备落后，又受到“文化大革命”的严重摧残，导致我国天文学研究距国际先进水平越来越远。

近 20 年是我国天文学发展最快的时期，在不少学科领域上逐步接近国际先进水平。但是，从总体上来说还没有改变落后的局面。无论是天文学理论课题还是观测课题，创新性很强的仍然太少了。这





和我国当前的国力仍不十分强大有关。科研环境和条件是不容回避的问题。在天文观测设备方面,我国虽有较大的改善,但和国际相比依然落后。北京天文台的口径2.16米的光学望远镜是国内最大的,但是,美国威尔逊山天文台在1917年就建成了口径2.54米的反射望远镜。就是这台望远镜帮助哈勃确认了仙女座大星云是河外星系,进而发现了哈勃定律。上海天文台和乌鲁木齐天文站口径25米的射电望远镜也是国内最大的。可是国际上在20世纪60年代就有口径64米、76米甚至口径305米的射电望远镜了。这方面就连印度也比我国强,他们新近研制完成的由30面口径45米的抛物面天线组成的巨型米波射电望远镜阵,在世界上也是数得上的大设备。空间天文观测更落后,我国至今还没有一个天文卫星上天。在目前条件下,我国天文学家无缘诺贝尔奖恐怕也是很自然的。

我国是一个大国,大学教育水平是相当高的。头脑聪明、刻苦好学、理论基础好、实验能力强的学生不乏其人。但是,我们的博士研究生、硕士研究生和他们导师所处的科研环境和条件与国际上的著名研究单位和大学相比差得很远,很难让他们在最前沿的研究课题上处于世界领先地位。如果我们的优秀学生能像贝尔女士那样跟着导师休伊什进行当时灵敏度最高、时间分辨率最好的行星际闪烁的研究,或像赫尔斯那样跟着导师泰勒去完成一项当时世界上灵敏度最高的巡天,他们应该也会有发现射电脉

冲双星和脉冲星的机会和能力。

从取得获奖成果到获奖时间间隔最短的是休伊什,花了7年;福勒则是在26年以后。钱德拉塞卡虽然在20岁时就取得突出成果,但只是在他进行50年研究取得系统性的成果以后才获此殊荣。坚持长期的、艰苦的努力,决不急功近利,这不仅要求科学家具有坚韧不拔的精神,还要求有良好的科研环境、充足的经费等等社会条件。这就有赖于决策者的远见卓识了。

目前,我国天文学科受到国家重视,研制大型天文观测设备的计划陆续出台。研制大天区面积多目标光纤光谱天文望远镜(简称LAMOST)已列为国家支持的重大项目(图21)。这台光学望远镜的口径为4米,其特点是大口径和大视场兼而有之,有可能在光谱巡天方面在国际上起主导作用。正在进行预

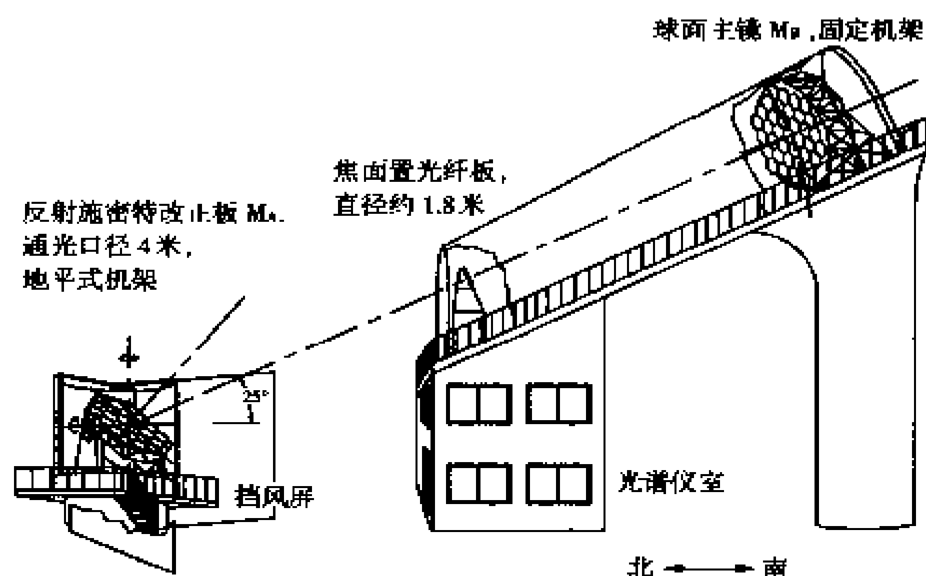


图21 我国正在研制的大天区面积多目标光纤光谱望远镜(LAMOST),其特点是大口径和大视场兼而有之





研究的500米口径射电望远镜如果能实现，将成为国际上最大的单天线射电望远镜。空间太阳望远镜和空间X射线望远镜也在预研究之中。未来的10年内，我国天文学科的观测能力将有重大的提高，年轻一代天文学家将会有比现在好得多的科研条件。这个发展趋势应该一直保持下去，坚持50年、100年，中国天文学必将有一个大发展，中国天文学家获得诺贝尔物理学奖的梦想也应该能够实现。

本卷大事记

1911～1912 年　奥地利物理学家赫斯用气球把“电离室”送到离地面 5000 多米的高空，进行大气导电和电离的实验，发现来自地球之外的宇宙线。为此，他于 1936 年荣获诺贝尔物理学奖。

1911～1913 年　丹麦天文学家赫茨普龙和美国天文学家罗素各自独立地得到恒星光度和光谱型之间的关系图，简称赫罗图。赫罗图在研究恒星起源和演化中起着举足轻重的作用。

1926 年　英国天文学家爱丁顿出版专著《恒星内部结构》，成为恒星结构理论的经典著作。

1929 年　哈勃发现著名的哈勃定律：星系的距离越远，红移越大，表明越远的星系退行的速度越大，意味着宇宙在膨胀。

1931 年　美国无线电工程师央斯基首次发现了来自银河系中心方向的射电辐射。





1932年　苏联物理学家朗道提出宇宙空间中可能有完全由中子组成的致密星。

1934年　巴德和兹维基分别提出中子星的概念。

印度裔美国天体物理学家钱德拉塞卡利用简并电子气的物态方程建立起白矮星模型。在这个模型中，白矮星的质量不会大于太阳质量的1.44倍，后来人们称这一上限为钱德拉塞卡极限。

1937年　美国无线电工程师、天文学家韦伯研制成世界上第一架射电望远镜，其抛物面天线的口径为9.45米。

1938年　美国核物理学家贝特提出太阳内部氢聚变反应的“碳—氮—氧循环”，为恒星能源和演化的研究奠定了基础。1967年，贝特因此荣获诺贝尔物理学奖。

1948年　俄裔美国物理学家伽莫夫提出大爆炸宇宙模型，其研究生阿尔弗和赫尔曼据此计算得出宇宙中存在温度为5K的背景辐射。

瑞典天体物理学家阿尔文出版专著《宇宙动力学》，确立宇宙磁流体力学的基本原理。1970年，他因此荣获诺贝尔物理学奖。

1952年　英国射电天文学家赖尔提出综合孔径射电望远镜的思想。1974年，他因发明综合孔径射电望远镜和对遥远星系的观测而荣

获诺贝尔物理学奖。

1954年 英国天文学家布莱思按赖尔的思路在剑桥大学建成第一台综合孔径射电望远镜。

1956年 伯比奇夫妇、福勒和霍伊尔发表重要论文"星体元素的合成法",详论如何在恒星内部的核反应中生成各种重元素(即 B^2FH 理论)。1983年福勒因此荣获诺贝尔物理学奖。

1957年 美国物理学家汤斯预言星际分子的存在,并列出17种可能存在的星际分子。

1960年 剑桥大学建成等效口径1.6千米的综合孔径射电望远镜。

1963年 汤斯在实验室里测出两条处在射电频段的羟基(OH)谱线。

首次应用射电天文方法发现星际分子。

美国天文学家马丁·施米特发现类星体。

1965年 美国天文学家彭齐亚斯和威尔逊发现宇宙微波背景辐射。1978年,他们因此荣获诺贝尔物理学奖。

1967年 英国天文学家休伊什和贝尔发现脉冲星,并将其证认为自转的中子星。休伊什为此荣获1974年诺贝尔物理学奖。

1971年 剑桥大学建成等效口径为5千米的综合孔径射电望远镜。

1974年 美国天文学家泰勒和赫尔斯发现第一个射电脉冲双星系统 PSR1913+16。





1983年　美籍印度天体物理学家钱德拉塞卡因创建恒星结构和演化理论、确认白矮星质量上限而荣获诺贝尔物理学奖。

1989年　美国国家宇航局发射宇宙背景探测器(COBE)卫星。

1993年　赫尔斯和泰勒因发现射电脉冲双星和间接验证广义相对论预言的引力辐射而荣获诺贝尔物理学奖。